

地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析

李海波¹, 马行东¹, 李俊如¹, 戴会超², 肖克强¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 用 FLAC^{3D} 初步分析了地震荷载作用下埋深、洞室形状、地应力特征对地下岩体洞室位移特征的影响。分析结果表明: 地震荷载作用下, 地下洞室位移响应随埋深的增加而减小, 当地应力侧压系数 $\lambda \geq 1$ (特别是 $\lambda > 2$ 时), 洞室位移响应存在临界埋深(200~300 m), 并随地应力侧压系数的增加而减小。洞室断面形状对洞室位移响应有一定影响, 圆形断面洞室拱顶和拱底位移较矩形和马蹄形小。分析结果还表明, 随地应力侧压系数的增加洞室位移明显减小, 幅度随埋深的增加有减小趋势, 地应力侧压系数 $\lambda < 1$ 时的洞室位移量值及随侧压系数的变化幅度明显大于地应力侧压系数 $\lambda > 1$ 时的情况。本文的工作可为工程设计提供一些概念性指导。

关键词: 地下洞室; 地震荷载; 位移特征; FLAC

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)03-0358-05

作者简介: 李海波(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石动力学研究。

Study on influence factors of rock cavern displacement under earthquake

LI Hai-bo¹, MA Xing-dong¹, LI Jun-ru¹, DAI Hui-chao², XIAO Ke-qiang¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. China Yangtze Three Gorges Projects Development Cooperation, Yichang 443002, China)

Abstract: The influence of overburden and cavern shape as well as in-situ stress condition on the displacement characteristics of rock cavern under earthquake were analyzed. It was reported that the cavern displacement decreased with the increasing overburden. When $\lambda \geq 1$ (especially $\lambda > 2$), there was a critical depth (200~300 m) which decreased with the increasing λ (side pressure coefficient). It was also suggested that the displacement of circular cavern was less than that of triangular and hoof-like cavern under the same loading condition. As well, the cavern displacement decreased with the increasing λ (side pressure coefficient), and the decreasing rates tended to decrease with the increasing overburden. It was further revealed that the cavern displacement and its decreasing rate with increasing λ at the condition of $\lambda < 1$ were significantly larger than those of $\lambda > 1$. The present work could be used as a primary guidance to the anti-earthquake design for underground cavern.

Key words: underground cavern; seismic loading; displacement characteristics; FLAC

0 引言

地下工程破坏是地震引起的主要灾害之一。如 1976 年的唐山大地震, 造成了大量地下通道、煤矿巷道和人防工程的破坏^[1]。1923 年的日本关东大地震, 致使邻近约 25 条隧道受到严重破坏^[8]。1930 年日本伊豆发生 7.0 级地震, 使正在修建的丹那铁路隧道在穿越丹那断层带(宽 40 m)处的排水导洞错开 2.40 m, 也使惠那山公路隧道排水洞产生水平向错动 2.39 m、竖向错动 0.6 m^[8]。1995 年发生的日本大阪神户地震, 造成地铁车站、地下停车场、地下商业街发生严重破坏^[9]。1996 年美国旧金山 8.3 级地震, 使奈特 1 号隧道沿圣安德烈斯断层产生 1.37 m 的水平位移, 相邻的奈特 2 号隧道支架断裂、顶部坍塌^[9]。1989 年美国 Loma Prieta 地震, 导致部分海底隧道破坏^[12]。1999

年台湾集集地震, 造成地震区附近高速公路隧道、水电站地下输水管道、铁路隧道等发生不同程度的破坏。其中, 一水电站的地下输水隧道垂直向变形达到 4 m, 水平向变形高达 3 m, 整个隧洞破坏^[10]。

目前, 针对地震荷载作用下岩体洞室(隧道)安全的相关研究重要集中在震后现场调查以及数值分析的初步工作。例如, 文献^[2-12]根据地震后的现场调查分析了地下岩体工程的变形破坏模式、程度与覆盖层厚度、岩石类型、支护类型、地震参数之间的关系。文献^[13-18]应用有限元、离散元等分析方法, 分析了地

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50439030); 973 项目(2002CB412705)

收稿日期: 2005-03-28

下岩体洞室(隧道)在地震动荷载作用下的速度、加速度、位移等响应特征和规律。本文尝试采用FLAC^{3D}初步分析埋深、洞室形状、地应力对地震荷载作用下地下岩体洞室位移响应的影响规律,旨在为工程设计提供一些概念性指导。

1 计算模型及参数选取

1.1 计算模型

数值分析中,取100 m×40 m×150 m的区域为研究对象,洞室基本尺寸为10 m×40 m×10 m。计算模型、断面形状以及数值分析中的监测点位置见图1所示。

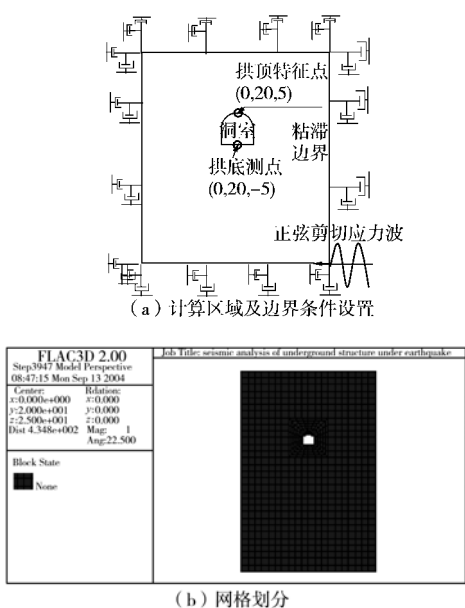


图1 计算模型

Fig. 1 Computational model

1.2 岩石力学模型和屈服准则

数值模拟中,采用理想弹塑性模型,屈服准则采用Mohr-Coulomb强度准则,屈服函数如下^[19]:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (1)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (2)$$

式中 σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力; ϕ 为摩擦角; c 为粘聚力; σ^t 为岩石抗拉强度;

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

当岩体内某一点应力满足 $f_s < 0$ 时,发生剪切破坏;当满足 $f_t > 0$ 时,发生拉伸破坏。

1.3 岩体基本物理力学指标

模型岩石介质为凝灰岩,考虑到低应变速率下,岩石的动态力学参数与静态力学参数差异不大,本次数值模拟中采用岩石的静态参数^[20],各项物理力学指标见表1所示。

表1 岩石物理力学指标

Table 1 Properties of intact rock material	
力学特性	值
密度/(kg·m ⁻³)	2500
弹性模量 E_r /GPa	45.6
体积模量 K_r /GPa	34.5
剪切模量 G_r /GPa	17.8
泊松比	0.28
粘聚力/MPa	1.0
摩擦角/(°)	41
抗拉强度/MPa	1.1

1.4 地震荷载及边界约束条件选择

考虑到剪切波对洞室响应影响较大,模拟的地震波为施加在模型底面的正弦剪切应力波,其速度时程表征为: $v = \lambda \sin(\frac{2\pi}{T}t)$, 最大幅值取为0.13 m/s, 卓越周期 T 为1 s, 频率为1 Hz, 持续时间为2 s。

为减少动荷载作用下边界反射波的影响,采用粘滞边界,如图1所示。在粘滞边界动态中,速度与加速度不能直接作用在模型边界,而要转换成力作用在模型上^[19],转换的公式为

$$\sigma_n = 2(\rho C_p)v_n \text{ 与 } \sigma_s = 2(\rho C_s)v_s \quad (4)$$

其中 σ_n 为施加的正应力; σ_s 为剪应力; ρ 为密度, C_p 传入的P波; C_s 传入的S波; v_n 为振动点垂直速度分量; v_s 为振动点切向速度分量。

C_p 与 C_s 计算公式如下:

$$C_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \text{ 与 } C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (5)$$

因此,本模型的实际分析中,速度时程转化为相应的应力时程,转换关系式如下:

$$\sigma_s = 2(\rho C_s)v_s = 2\sqrt{G\rho}\lambda \sin(\frac{2\pi}{T}t) \quad (6)$$

同时,数值模拟中采用局部阻尼。局部阻尼系数取为0.125。

1.5 洞型、埋深、地应力地确定

为分析不同断面洞室形状下的位移响应,数值分析中,取矩形、马蹄形和圆形三种断面洞室。马蹄形断面上部尺寸为半径5 m的半圆,下部为5 m×10 m的矩形;矩形断面尺寸为10 m×10 m的矩形;圆形断面尺寸为半径为5 m的圆。三种模型取相同特殊监测点,监测点坐标为拱顶(0, 20, 5)、拱底(0, 20, -5)。根据实际工程中洞室的可能埋深情况,数值分析中,埋深分别取为100、200、300、500、1000 m。同时,以最大水平地应力与垂直向地应力的比值(侧压系数 λ) 表征不同的地应力状态。实际分析中,取隧道轴向与最大主应力方向一致。垂直应力近似表示为岩体自重($\sigma_v = \gamma h$),最大水平主应力取为 $\sigma_h = \lambda \sigma_v$,

侧压系数 λ 取 0.5~5.5, 最小水平主应力取为最大水平主应力的一半。

2 埋深对洞室位移的影响分析

图 2、图 3 分别为地应力侧压系数 $\lambda = 0.5、1、2、3、4$, 埋深为 100、200、300、500、1000 m 时马蹄形、矩形、圆形断面洞室不同点的位移变化规律, 可以看出在地震荷载作用下, 洞室拱顶和拱底位移量值都随埋深的增加明显减小。

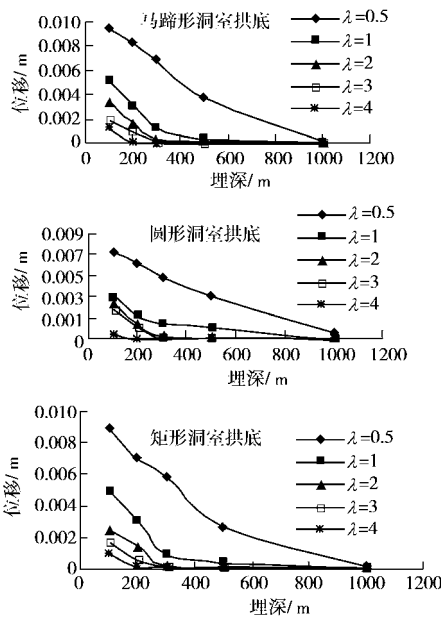


图 2 洞室拱底位移与埋深关系

Fig. 2 Relationship between bottom displacements and depths of cavern

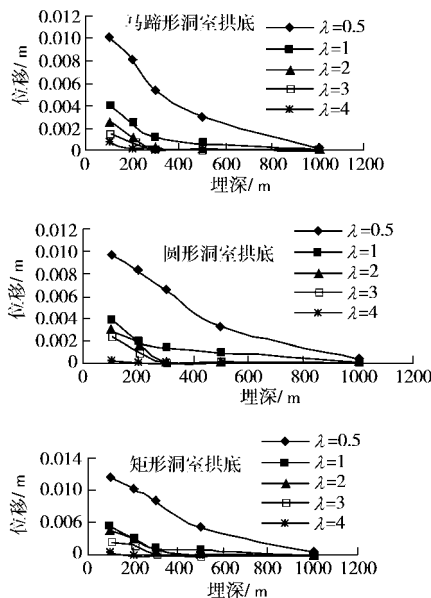


图 3 洞室拱顶位移与埋深的关系

Fig. 3 Relationship between vault displacements and depths of cavern

图 2、3 的分析结果还表明, 在地应力侧压系数 $\lambda \geq 1$ (特别是 $\lambda > 2$ 时) 的情况下, 当埋深小于 200~300 m 时洞室不同点的位移量值较大, 位移量值随埋深的变化幅度也较大。当埋深超过 200~300 m 后, 位移量值较小, 其随埋深的变化幅度不大。因此, 埋深 200~300 m 左右可能是地震荷载作用下洞室位移变化的临界点。同时, 当侧压系数 $\lambda \geq 1$ 时, 随着侧压系数 λ 的增加, 洞室位移变化的埋深临界点有明显的减小趋势, 逐步从 300 m 减小到 200 m。另外, 数值分析结果还表明, 当侧压系数 λ 小于 1 时, 洞室位移变化的埋深临界点不明显, 洞室位移随埋深的增加呈近似线性递减。

3 洞室形状对洞室位移的影响

图 4 为侧压系数 $\lambda = 2$ 以及不同埋深情况下, 马蹄形、矩形、圆形三种断面形状的洞室位移响应的变化规律。可以看出, 在地震荷载作用下, 不同断面形状的洞室拱顶和拱底位移响应有一定区别, 圆形洞室位移响应最小, 矩形洞室位移响应最大。但是当埋深超过 300 m 后, 三种断面形状的洞室拱顶和拱底位移基本相同。

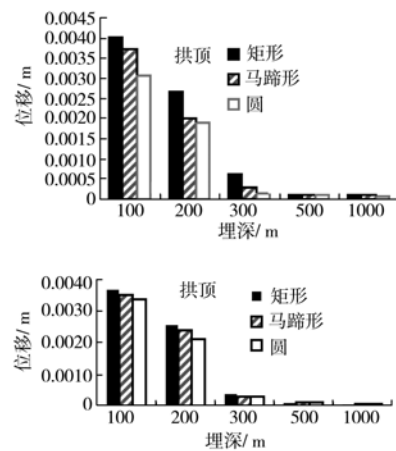


图 4 不同埋深下洞室位移随洞室断面变化情况 ($\lambda = 2$)

Fig. 4 Variation of displacements with depths ($\lambda = 2$) for caverns with different shapes

图 5 为埋深 200 m 以及不同地应力情况下, 马蹄形、矩形、圆形三种断面形状的洞室位移响应的变化规律。可以看出, 在不同侧压系数情况下, 圆型洞室的位移响应较矩形和马蹄形小。

4 地应力特征对洞室位移的影响

图 6、图 7 分别是埋深为 100、200、300、500、1000 m 时马蹄形、矩形、圆形断面洞室拱底、拱顶测点位移随地应力变化规律。可以看出在地震荷载作用下, 洞室拱顶和拱底位移随侧压系数的增加而减小。

当地应力侧压系数 $\lambda < 1$ 时, 洞室拱顶和拱底位移的量值和变化幅度较大, 而当地应力侧压系数 $\lambda > 1$ 时, 洞室拱顶和拱底位移的量值和变化幅度较小。同时, 随着埋深的增加, 洞室拱顶和拱底位移随侧压系数的变化幅度具有明显的减小趋势。

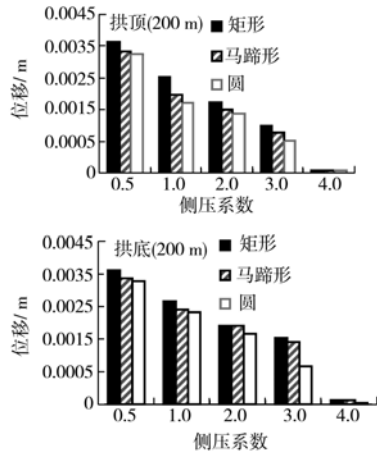


图5 不同地应力情况下洞室位移随洞室断面变化情况(埋深=200 m)

Fig. 5 Variation of displacements with shapes of cavern under different in-situ stress conditions (depth=200 m)

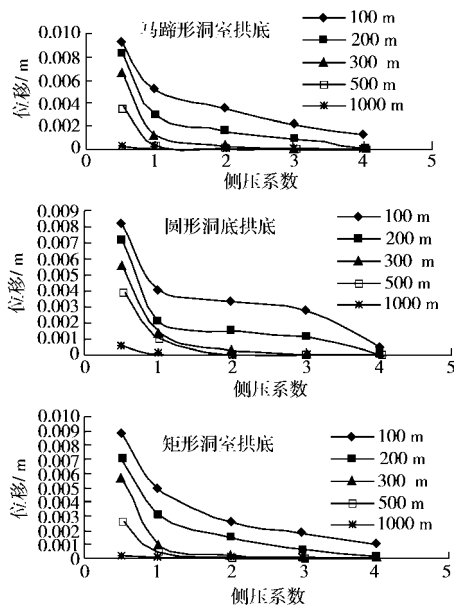


图6 拱底位移与地应力的关系(不同埋深)

Fig. 6 Relationship between bottom displacement and in-situ stresses (different depths) of cavern

5 结论及讨论

本文利用FLAC^{3D}分析了地震荷载作用下埋深、洞室形状、地应力特征对岩体洞室位移特征的影响规律, 研究结果表明:

(1) 地震荷载作用下, 地下洞室位移响应随埋深增加而减小, 因此, 浅埋情况下洞室的位移响应大于

深埋情况。另外, 在地应力侧压系数 $\lambda \geq 1$ (特别是 $\lambda > 2$ 时即水平主应力占主导的情况下), 洞室位移响应存在临界埋深(200~300 m), 并随地应力侧压系数的增加而减小。

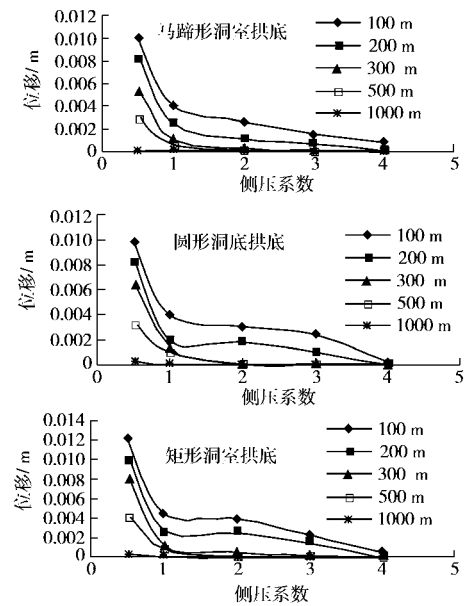


图7 拱顶位移与地应力的关系(不同埋深)

Fig. 7 Relationship between vault displacements and in-situ stresses (different depths) of cavern

(2) 洞室断面形状对洞室位移响应有一定影响, 在数值分析中确定的地震荷载作用下以及地应力和埋深状况下, 圆形断面洞室拱顶和拱底位移较矩形和马蹄形小。

(3) 随地应力侧压系数的增加洞室拱顶和拱底位移明显减小, 减小幅度随埋深的增加有减小趋势。同时, 地应力侧压系数 $\lambda < 1$ (垂直应力为主导)时的洞室位移量值及随侧压系数的变化幅度明显大于地应力侧压系数 $\lambda > 1$ (水平应力为主导)时的情况。

值得指出的是, 地震荷载作用下洞室的位移响应分析是一个非常复杂的问题, 同时, 影响洞室位移响应的因素多种多样, 本文基于简单的荷形式载和计算模型分析埋深、洞室断面形状以及地应力特征对洞室位移的影响规律, 仅仅是一个非常初步的研究工作, 还需要做进一步深入的探讨, 但是本文的工作还是可以工程设计提供一些概念性指导。

参考文献:

[1] LEE C F. Performance of underground coal mines during the 1976 Tangshan Earthquake[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1987,2: 199 - 202.
 [2] 雷谦荣, 丁济新. 地震对地下洞室的破坏[J]. 地下空间, 1992,12:12 - 4. (LEI Qin-rong, DING Ji-xin. Seism

- induced failure of underground tunne[J]. *Underground Space*. 1992, **12**:4 - 12.)
- [3] 郑永来,杨林德.地下结构震害与抗震对策[J].工程抗震, 1999, **4**:23 - 28. (ZHENG Yong-lai, YANG Lin-de. Earthquake damage of underground structure and aseismatic method[J]. *Earthquake Resistant Engineering*. 1999, **4**: 23 - 28.)
- [4] 于翔.地下建筑结构应充分考虑抗震问题—1995年阪神地震破坏的启示[J].工程抗震, 2002, **4**:17 - 20.(YU Xiang. Underground structures are always considered possessing well anti-seismic capability — Revelation of 1995 Hyogoken-Nambu earthquake[J]. *Earthquake Resistant Engineering*. 2002, **4**: 17 - 20.)
- [5] 于翔.地铁建设中应充分考虑抗地震作用—阪神地震破坏的启示[J].铁道建筑技术, 2000, **6**: 32 - 35.(YU Xiang. Subway construction are always considered possessing well anti-seismic capability — Revelation of Hyogoken-Nambu earthquake[J]. *Railway Construction Technology*. 2000, **6**: 32 - 35.)
- [6] 季倩倩,杨林德.地下铁道震害与震后修复措施[J].灾害学, 2001, **16**(2): 31 - 36.(JI Qian-qian, YANG Lin-de. Seismic dam age and restoration measures of subway[J]. *Journal of catastrophology*. 2001, **16**(2): 31 - 36.)
- [7] 张玉娥,白宝鸿,张耀辉,王赞之.地铁区间隧道震害特点、震害分析方法及减震措施的探讨[J].振动与冲击, 2003, **22**(1): 63,70 - 71.(ZHANG Yu-e, BAI Bao-hong, ZHANG Yao-hui, WANG Zan-zhi. Discussion of earthquake damage characteristics, analytical method and shock absorption measure of subway tunnel[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2003, **22**(1): 63,70 - 71.)
- [8] 潘昌实.隧道及地下结构物抗震问题的研究概况[J].世界隧道, 1996, **5**: 7 - 16.(PAN Chang-shi. Survey to study of tunnel and underground structure anti-seism[J]. *Tunnel International*, 1996, **5**: 7 - 16.)
- [9] WANG W L, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2001, **16**: 133 - 150.
- [10] SHARMA S, JUDD W R. Underground opening damage from earthquakesp[J]. *Engineering of Geology*. 1991, **30**: 263 - 276.
- [11] YOUSSEF M A, HASHASH, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2001, **16**: 247 - 293.
- [12] 李小军.地下隧道式结构动力分析方法研究[M].北京:科学出版社.1997: 94 - 104.(LI Xiao-jun. Study on dynamic analysis of underground tunnelling structures[M]. Beijing: Science Press. 1997,94 - 104.)
- [13] LI X J, THOMAS H R, HE Y. An explicit method for the analysis of the earthquake response of nuclear waste repository[R]. Research Reports of University of Wales, 1997.
- [14] 金峰,王光纶,贾伟伟.离散元-边界元动力耦合模型在地下结构动力分析中的应用[J].水利学报,2001(2): 24 - 28.(JIN Feng, WANG Guang-lun, JIA Wei-wei. Application of distinct element-boundary element coupling model in underground structure dynamic analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(2): 24 - 28.)
- [15] 陈健云,胡志强,林皋.超大型地下洞室群的随机地震响应分析[J].水利学报, 2002(1): 71 - 75.(CHEN Jian-yun, HU Zhi-qiang, LIN Gao. Random seismic response analysis of large-scale underground caverns[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002(1): 71 - 75.)
- [16] 黄润秋,王贤能,唐胜传.深埋隧道地震动力响应的复反应分析[J].工程地质学报,1997, **5**(1): 1 - 7.(HUANG Yun-qiu, WANG Xian-neng, TANG Sheng-chuan. Complex analysis of seismic response of a mountain tunnel[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1997, **5**(1): 1 - 7.)
- [17] 张丽华,陶连金.节理岩体地下洞室群的地震动力响应分析[J].世界地震工程, 2002, **18**(2):158 - 162.(ZHANG Li-hua, TAO Lian-jin. Dynamic response analysis of large underground excavations in jointed rock[J]. *World Earthquake Engineering*, 2002, **18**(2):158 - 162.)
- [18] FLAC^{3D} user's manual[M]. Version 2.0. Itasca Consulting Group Inc, 1995.
- [19] 夏祥,李俊如,李海波,刘亚群,周青春.爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J].岩土力学, 2005, **26**(1): 50 - 56.(XIA Xiang, LI Jun-ru, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, ZHOU Qing-chun. Udec modeling of vibration characteristics of jointed rock mass under explosion[J] *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(1): 50 - 56.)