

动荷载作用下地下岩体洞室应力特征的影响因素分析*

马行东¹, 李海波¹, 肖克强¹, 冯海鹏¹, 戴会超²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 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}初步分析了动荷载作用下埋深、洞室形状、地应力特征对地下岩体洞室应力特征的影响。分析结果表明: 动荷载下, 随着埋深的增加, 各种洞型应力量值有明显的减小趋势; 地应力状态对地形洞室的应力响应有较明显的影响, 在自重地应力为主的情况下, 洞室拱顶、拱底地最小主应力处于拉应力状态, 而构造地应力为主的情况下, 洞室拱顶、拱底最小主应力处于压应力状态, 且随着侧压系数的增加, 洞室的应力由较明显的减小趋势; 动荷载作用下, 不同断面形状的洞型应力响应有一定区别, 圆形洞室应力响应最小, 矩形洞室应力响应最大, 随埋深、地应力的增加, 洞形对洞室应力响应影响减小, 当埋深超过300 m后, 洞型对应力的影响变化程度不大。

关键词: 应力特征; 动荷载; 地下岩体洞室; 侧压系数; 动力参数

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2006)02-0164-06

0 引言

一般认为, 动荷载作用下地下建筑物(隧道和洞室)的破坏程度要小于地面建筑物, 但是, 近年来发生的一些大地震如1995年日本阪神地震^[1]和1999年台湾集集地震^[2]都使不少地下结构遭受严重的破坏, 使得动荷载作用下地下工程安全评价再次成为工程抗震的热点问题之一。随着西部大开发战略的实施, 一大批大型水利水电工程已经或即将在我国西部强地震多发区且高抗震设防地震烈度区营建, 动荷载作用下这些大型工程的地下岩体洞室安全将是工程建设中面临的难点问题。目前, 针对动荷载作用下地下工程安全分析主要集中在震后现场调查以及数值分析的初步分析方面。例如, 文献[1~5]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[6~10]应用有限元、离散元等对一些影响因素进行了动荷载下洞室响应的初步分析。本文尝试应用FLAC^{3D}初步分析动荷载作用下埋深、洞室形状、地应力对地下岩体洞室应力响应的影响规律, 旨在为工程设计提供一些参考。

1 计算模型及参数的选取

1.1 计算模型及边界约束

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单元位置

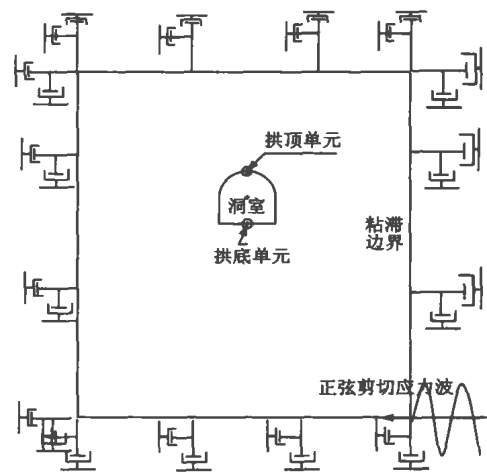


图1 计算区域及边界条件设置

Fig. 1 Computational area and boundary condition

* 收稿日期: 2005-05-18; 修回日期: 2005-11-25

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

作者简介: 马行东(1978-)男, 硕士研究生, 主要从事数值模拟和岩石动态响应研究。Email: cumtxiaomad@163.com

见图1所示。为减少动荷载作用下边界反射波的影响,采用粘滞边界^[11],约束边界见图1所示,局部阻尼系数取为0.125。

1.2 岩石力学模型和参数

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(文献^[11]):

$$f_s = \sigma - \sigma_N + 2c \quad (1)$$

$$f_t = \sigma - \sigma \quad (2)$$

式中 σ 、 σ 分别为最大、最小主应力;

ϕ 为摩擦角;

c 为粘聚力;

σ 为岩石抗拉强度。

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

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。

模型岩石介质为凝灰岩,其物理力学指标见表1^[12]。

表1 岩石物理力学指标

Table 1 Properties of intact rock material

力学特性	值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 650
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/($^\circ$)	41
抗拉强度/MPa	1.1

1.3 荷载、洞型、埋深及地应力的确定

模拟的地震波为施加在模型底面的正弦剪切应力波,其速度时程为: $v = \lambda \sin(\frac{2\pi}{T}t)$, 根据文献^[2, 14],最大幅值取为0.13 m/s;卓越周期 T 取为1 s,频率取1 Hz;动荷载持续时间取为2 s(相当于7度地震)。

由于在粘滞边界动态中,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(文献^[11]),于是有

$$\sigma = 2(\rho c_s) v_s = 2 \rho \lambda \sin(\frac{2\pi}{T}t) \quad (4)$$

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3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;圆形断面半径为5 m。3种模型取相同特殊监测单元。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、1 000 m。

实际分析中,取隧道轴向与最大主应力方向一致。垂直应力可近似表示为岩体自重($\sigma = \gamma h$),最大水平主应力取为 $\sigma = \lambda \sigma$,侧压系数 λ 取值范围为0.5、2、3、4,最小水平主应力取为最大水平主应力的一半。

2 计算结果及分析

2.1 埋深、地应力下洞室应力响应分析

图2为动荷载作用下不同地应力、不同埋深情况下矩形、马蹄形和圆形3种洞型拱顶、拱底的最小主应力变化曲线。可以看出,自重地应力为主(侧压系数 $\lambda < 1$)的情况下,洞室拱顶、拱底处于拉应力状态;构造地应力为主(侧压系数 > 1)的情况下,洞室拱顶、拱底处于压应力状态,应力量值随着侧向压力的增加而减小。图2的分析结果还表明,各种地应力状态下,随着埋深的增加,洞室拱顶、拱底的最小主应力值有较明显的减小趋势,这与文献^[4]的现场调查结果是相似的。

图3为动荷载引起的拱顶、拱底最大主应力随埋深以及地应力特征的变化曲线。可以看出,在不同的地应力状态和埋深下,拱顶、拱底最大主应力均处于压应力状态。同时,与最小主应力的变化规律相似,最大主应力随着侧向压力以及埋深的增加而减小(与文献^[4]的现场调查结果相似),但当地应力侧压系数达到4时,最大主应力受埋深的影响较小。

2.2 洞型对洞室应力响应

图4、图5是动荷载作用下的3种洞型拱顶和拱底单元的最大、最小主应力变化情况。可以看出,不同断面形状的洞型拱顶和拱底动荷载引起的应力响应有一定区别,圆形洞室应力响应最小,矩形洞室应力响应最大。随埋深的增加,应力响应减小,当埋深超过300 m后,洞型对应力的影响程度不大。同时可以看出,在不同侧压系数情况下,圆形洞室的应力响应较矩形和马蹄形小,随侧压系数的增加,洞室

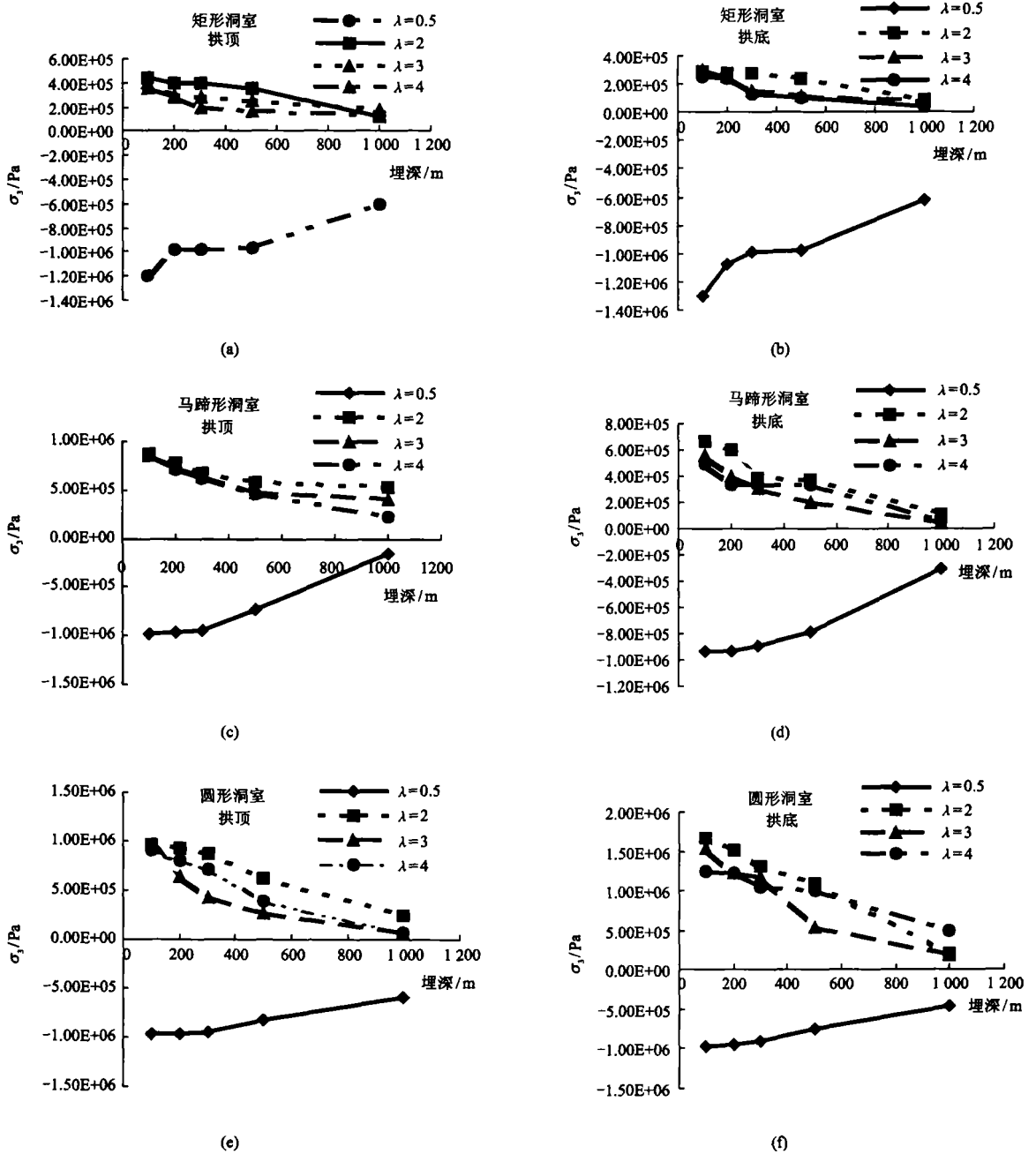
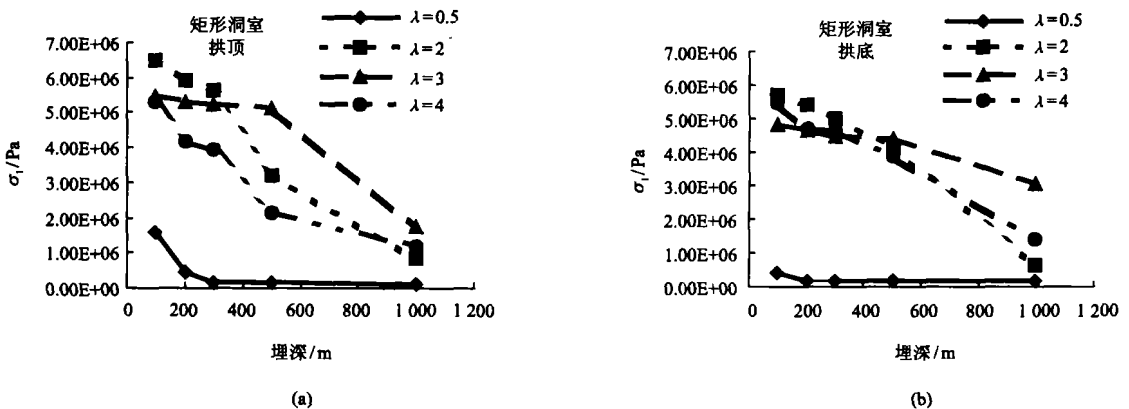


图2 洞室最小主应力应力与埋深和地应力关系

Fig. 2 Changes of σ_3 for cavern under earthquake with different buried depths and in-situ stress conditions



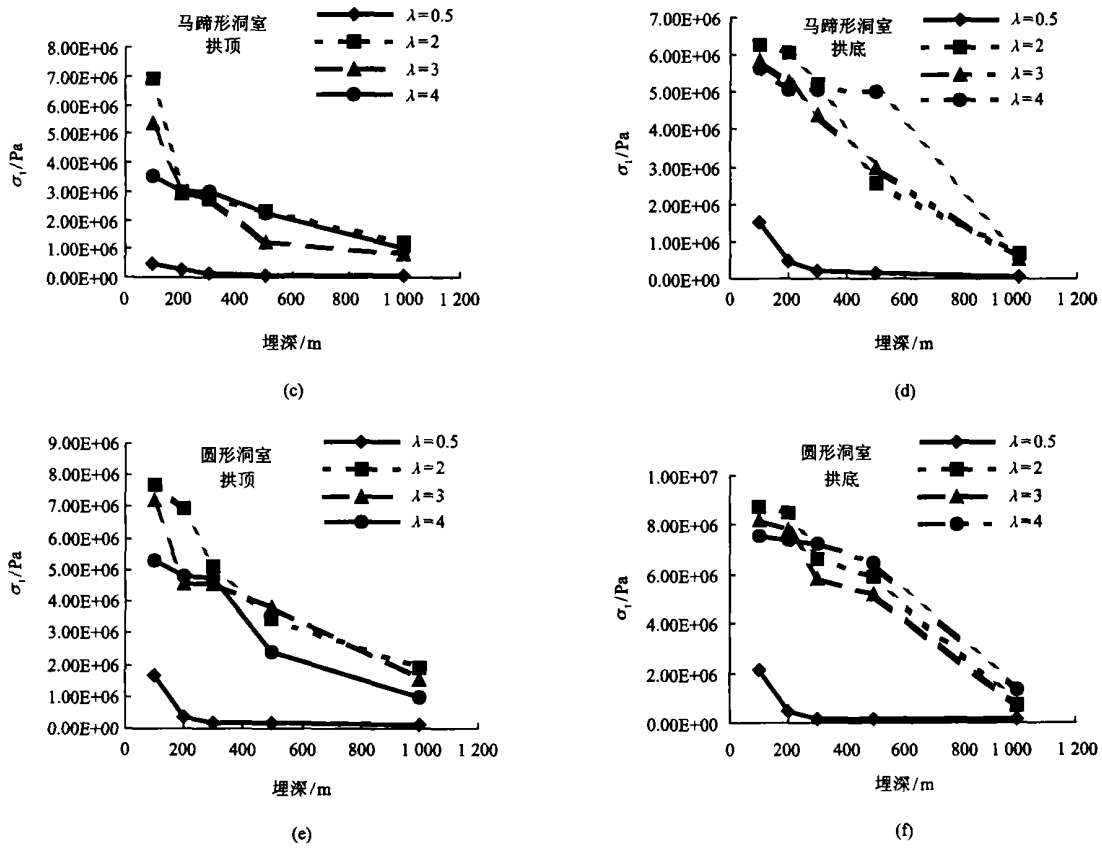


图 3 洞室最大主应力与埋深和地应力的关系

Fig. 3 Change of σ_1 for cavern under earthquake with different buried depths and in-situ stress conditions

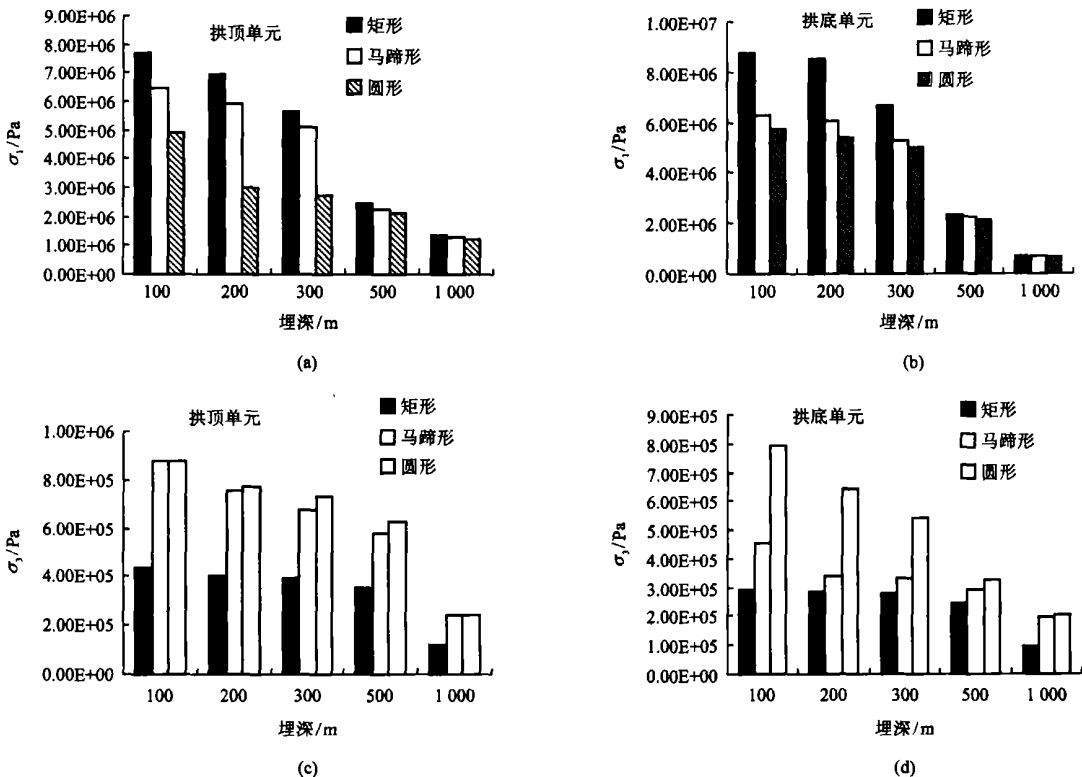


图 4 不同埋深下洞室应力随断面变化情况($\lambda=2$)

Fig. 4 Change of cavern stress with sectional shapes at different buried depths ($\lambda=2$)

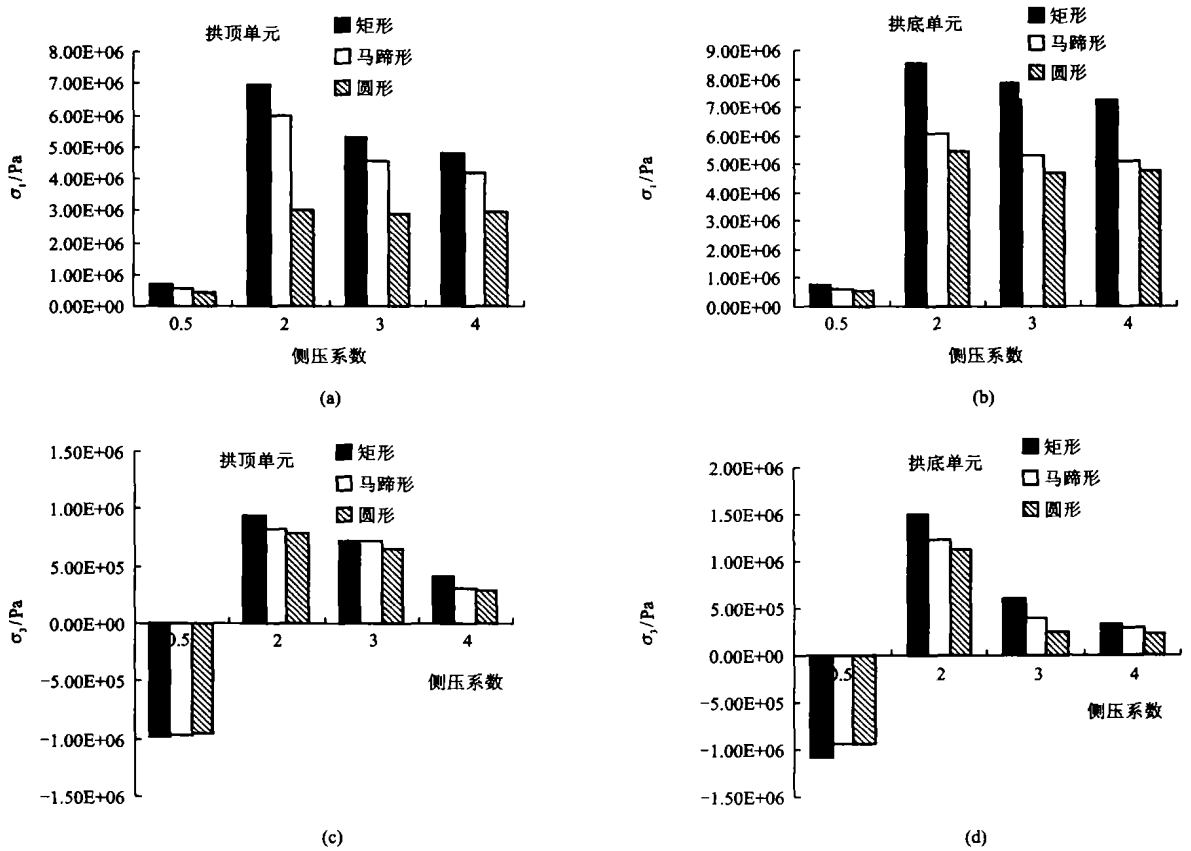


图5 不同地应力情况下洞室应力随断面变化情况(埋深=200 m)

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

应力减小,当侧压系数超过4时,洞型对应力的影响变化程度不大。

3 结论

本文利用FLAC^{3D}分析了动荷载作用下埋深、洞室形状、地应力等对岩体洞室应力特征的影响规律,研究结果表明:

与震后现场调查结果相似,不同地应力状态下,随着埋深的增加,各种洞型应力量值均有较明显的减小趋势,但是,当侧压系数达到4时,洞室应力值随深度的变化较小。

地应力状态对地形洞室的响应有较明显的影响。自重地应力为主的情况下,洞室拱顶、拱底最小主应力处于受拉状态;构造地应力为主的情况下,洞室拱顶、拱底最小主应力处于压应力状态,而最大主应力始终处于受压状态。随着地应力侧压系数的增加,洞室的最大和最小主应力有较明显的减小趋势。

不同断面形状的洞型拱顶和拱底动荷载引起的

应力响应有一定区别,圆形洞室应力响应最小,矩形洞室应力响应最大。随埋深、地应力的增加,洞形对洞室应力响应影响减小,当埋深超过300 m后,洞形对应力的影响程度不大。

值得指出的是,本文基于简单的FLAC^{3D}模型分析了埋深、洞室断面形状以及地应力特征对洞室应力的影响规律,仅仅是一个非常初步的研究,由于缺乏现场实验数据,分析得到的各种洞型在动荷载作用下的应力量值等没有佐证。但是,本文得到的洞室应力与埋深等的关系与现场调查结果得到的规律是基本相近的,因此,尽管粗浅,本文还是可以为工程设计提供一些概念性指导。

参考文献:

- [1] 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]. 隧道/地下工程, 2000, (6): 32-35
 Yu X. Earthquake-resistant behavior should be stressed in subway construction: Inspiration from Os-

- aka-Kobe earthquake[J]. *Railway Construction Technology*, 2000, (6): 32-36
- [2] Wang W L, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, (16): 133-150
- [3] C. F. Lee. Performance of underground coal mines during the 1976 Tangshan earthquake [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1987, (2): 199-202
- [4] 郑永来, 杨林德. 地下结构震害与抗震对策 [J]. *工程抗震*, 1999, 12(4): 23-28
- Zheng Y L, Yang L D. Earthquake damage and anti-seismic countermeasures of underground structures [J]. *Engineering Anti-Seismic*, 1999, 12(4): 23-28
- [5] Sharma S, Judd W R. Underground opening damage from earthquakes [J]. *Engineering Geology*, 1991, (30): 263-276
- [6] 韦敏才. 地下结构的动力特性及地震反应分析 [J]. *昆明理工大学学报*, 1996, 21(3): 59-63
- Wei M C. Analysis of dynamic property and earthquake response of underground structure [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 1996, 21(3): 59-63
- [7] 胡晓燕, 周健, 胡晓虎. 地震引起的竖向应力对地铁隧道的影 响 [J]. *工程抗震*, 2000, (2): 32-35
- Hu X Y, Zhou J, Hu X H. The influence of vertical stress induced by earthquake to the subway tunnel [J]. *Engineering Anti-Seismic*, 2000, (2): 32-35
- [8] 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 F, Wang G L, Jia W W. Application of distinct element-boundary element coupling model in underground structure dynamic analysis [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, (2): 24-28
- [9] 高峰, 李祖德. 隧道三维地震反应分析若干问题的研究 [J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(4): 48-53
- Gao F, Li Z D. A study on some problems concerning 3-D analysis of seismic responses of tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(4): 48-53
- [10] 周德培. 强震区隧道洞口段的动力特性研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(1): 124-130
- Zhou D P. Dynamic behavior of portal patrol tunnel subjected to strong ground motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1998, 18(1): 124-130
- [11] FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis 3 Dimensions) user's manual, Version 2.0 [M]. Itasca Consulting Group, Inc., 1995
- [12] 夏祥, 李俊如, 李海波, 等. 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 X, Li J R, Li H B, et al. Numerical modeling of vibration characteristics of jointed rock mass under explosion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 50-56
- [13] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京: 地震出版社, 1988
- Hu Y X. *Earthquake Engineering* [M]. Beijing: Publishing House of Earthquake. 1988
- [14] 黄润秋, 王贤能. 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 R Q, Wang X N. Complex analysis of seismic response of a mountain tunnel [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1997, 5(1): 1-7

(下转第228页)

On the basis of the research about the place for evacuation during earthquake, Yinzhiquan and Lihe's prediction methods of seismic hazard, and Xielili's destruction condition after earthquake, I study the criterions of park green-belt for evacuation during earthquake in city's built-up area, developing area and new building area through qualitative and quantitative methods. If cities' governors make planning about criterions for evacuation during earthquake according to park green belt's criterions put forward in this paper, they will not only achieve the demand of evacuation during earthquake, but also improve city virescence.

Key words: park greenbelt; evacuation during earthquake; park greenbelt criterion

(上接第169页)

Study on the Factors Influencing Stress Characteristics of Rock Cavern under Earthquake

MA Xing-dong¹, LI Hai-bo¹, XIAO Ke-qiang¹, FENG Hai-peng¹, DAI Hui-chao²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. China Yangtze Three Gorges Projects Development Cooperation, Yichang 443002, China)

Abstract: The influence of buried depth, sectional shape of cavern and in-situ stress condition on the stress characteristics of rock cavern under earthquake are analyzed in the present paper by FLAC^{3D}. It is reported that the stress of various caverns clearly decreases with the increasing overburdens. It is also reported that the minimum stress of caverns is tensile when the horizontal stress is dominant; while vertical stress is dominate, the minimum stress of caverns is compressive; as well, the cavern stress clearly decreases with the increasing side pressure coefficient. It is further suggested that the stress of circular shape cavern is less than that of hoof shape and triangular cavern under the same loading condition. In addition, the influencing of cavern sectional shape on the stress condition decreases with the increasing buried depth and in-situ stress, when the buried depth is larger than 300 m, the influencing of cavern sectional shape is very slight.

Key words: stress characteristics; seismic loading; underground rock cavern; side pressure coefficient; dynamical parameter