

空间不均匀性对地下洞室的影响初探*

马行东¹, 李海波², 李扬¹, 阮浩³

(1 中国水电顾问集团成都勘察设计研究院, 四川 成都市 610072 2 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430074; 3 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛市 266033)

摘要: 用 FLAC^{3D} 初步分析了地震荷载作用下空间不均匀性对地下岩体洞室位移特征的影响。分析结果表明, 随埋深、地应力侧压系数的增加, 地震荷载的空间不均匀性对洞室的影响呈减小趋势。深超过 300 m 埋深情况下地震荷载的空间不均匀性对洞室的影响小于浅埋洞室, 侧压系数 $\lambda < 1$ 的情况下地震荷载的空间不均匀性对洞室的影响较侧压系数 $\lambda > 1$ 明显。

关键词: 空间不均匀性; 地震; 数值模拟; 地下洞室

中图分类号: U45 **文献标识码:** A

文章编号: 1005-2763(2006)05-0025-03

Primary Discussion on Influence of Spatial Inhomogeneous on Underground Cavern under Earthquake

Ma Xingdong¹, Li Haibo², Li Yang¹, Ruan Hao³

(1. Chenglu Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC(CHDI), Chengdu Sichuan 610072 China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. Qingdao Geotechnical Investigation And Surveying Research Institute, Qingdao Shandong 266033 China)

Abstract In order to discuss response of cavern under spatial inhomogeneous, indicate in the present paper the influence of spatial inhomogeneous on the displacement characteristics of underground rock cavern under the effect of earthquake load is analyzed by finite-difference program FLAC. The results of primary analysis indicate that the influence of spatial inhomogeneous on rock cavern under the effect of earthquake load will decrease with the increasing of the depth and ground stresses side pressure coefficient. When the depth is more than 300m the influence degree of spatial inhomogeneous on rock cavern under the effect of earthquake load is lower than that when the depth is shallow (depth < 300m); and influence of spatial inhomogeneous under the condition of side pressure coefficient 1 are significantly great than that of 1.

Key Words Spatial inhomogeneous Earthquake Numerical

simulation

长期以来, 工程上往往对地震动的空间变化做一些处理和简化, 随着空间分布与延伸性, 这些结构各部分受到的地震荷载将不同, 其结构(系统)地震反应分析需要地震动场作为地震输入。空间各点的地震动存在的变化不仅仅是相位时空的变化, 还存在于地面相邻的两点地震动的空间变化。

在工程上, 人们一般在时域内用相关函数、相关系数, 在频域内用功率谱密度函数、相干函数来定量描述地震动空间相关性的统计特征^[1~4]。文献[5]~[7]研究了震源距、震级等因素下对空间不均匀性参数的影响; 文献[8]~[9]研究了场地上相距 d 的 a 、 b 两点地震动的 Fourier 谱的关系式。为进一步研究地震荷载下空间不均匀性对地下岩体洞室的影响, 本文在前人空间不均匀性研究的基础上, 对地下空间模型的空间不均匀性荷载的确定进行了分析, 考虑了影响局部空间不均匀性的因素: 不同点间距离(面)输入不同的地震动荷载以及震源与场地的相对方位差等, 并对地震动荷载下空间不均匀性对地下岩体洞室的影响进行了数值模拟初步分析, 得出不均匀性下地下岩体洞室的响应。

1 计算模型及参数的选取

1.1 计算模型及约束条件

根据实际情况, 洞室的计算区域取 $100\text{ m} \times 40\text{ m} \times 150\text{ m}$ 。为减少动荷载作用下下边界反射波的影响, 采用粘滞边界^[10], 模型及约束见图 1。

1.2 岩体物理力学指标、屈服准则的确定

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, 各项物理力学指标见表 1。

* 收稿日期: 2005-11-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50439030)

作者简介: 马行东(1978-), 男, 江苏徐州人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向是数值模拟和岩石动态响应。

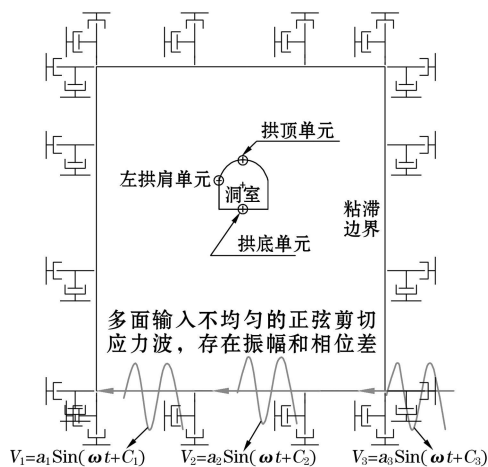


图 1 计算模型及边界条件设置

表 1 岩石物理力学指标

密度 (kg m ⁻³)	弹性模 量 Er (GPa)	体积模 量 Kr (GPa)	剪切模 量 Gr (GPa)	泊松比	粘聚力 (MPa)	摩擦角 (°)	抗拉 强度 (MPa)
2650	45.6	34.5	17.8	0.28	1.0	41	1.1

1.3 洞型、埋深、地应力、阻尼的确定

数值分析中,取矩形、马蹄形和圆形 3种断面洞室。马蹄形断面上部为半径 5 m 的半圆,下部为 5 m×10 m 的矩形;矩形断面为 10 m×10 m;圆形断面为半径为 5 m 的圆。3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)、左拱肩(-5 20 0)。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 100, 200, 300, 500, 1000 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(σ_v=γh),最大水平主应力取 σ_h=λσ_v,侧压系数取自重力地应力 λ=0.5,水平地应力 λ=2.34,最小水平主应力取最大水平主应力的一半。同时,数值模拟模型采用局部阻尼,局部阻尼系数取 0.125。

2 空间不均匀荷载的确定

2.1 幅值谱的确定

地震动的幅值谱常根据经验统计的方法确定,基岩场地的幅值谱:

$$A_p(f) = F_A(fM, R_p) \quad (1)$$

2.2 相关系数的确定

相关函数是描述两点地震动的相关程度的量,其值介于 0 与 1 之间,相干值越大,两点地震动的相关性越强,当 β_{ij}(ω, d_{ij})=1 时,两点的地震波波形式完全相同^[5]

$$\rho(\omega, d_{ij}) = \exp \left| -a \frac{\omega^* d_{ij}}{2\pi C_s} \right| \quad (2)$$

式中: a 为常数, C_s 为地震波传播速度, d_{ij} 为两点的距离。

2.3 地震动相位频谱的表示方法

为了综合描述各种介质中复杂因素对波传播的影响,引入了等效相速度量 C(f) 来建立相位谱模型^[8]。其计算基本公式为:

$$\varphi(f) = -2\pi fR C(f) \quad (3)$$

$$C(f) = C_0(f) [1 + \eta(f)] \quad (4)$$

$$C_0(f) = a_0 + a_1 \log_{10}(f) + a_2 [\log_{10}(f)]^2 \quad (5)$$

式中 C₀(f) 为确定性函数, η(f) 为服从正态分布 N(0, 1) 的随机变量, σ 为变异系数, a₀、a₁、a₂、σ 为经验系数。

2.4 合成不均匀性荷载的表示方法

经以上分析,可以得出空间不均匀合成的地震动时程:

$$U_j(t) = A_j(f) \rho_{ij}(\omega, d_{ij}) \cos[2\pi ft + \varphi_j(f)] \quad (6)$$

本文对合成的地震动时程进行理论简化,对三维模型采取多面地震输入来模拟空间不均匀性对洞室的响应影响,包括时间(相位差-行波效应)和空间的不均匀性(相关系数-不同振幅,体现相干效应),多面的输入存在相干性(振幅值略小于 VII 度平均值)以及存在相位差。

图 2 为非均匀荷载历史时程曲线,模拟的非均匀荷载的相关系数: 3 种波相关系数分别为 β_{ij}(ω, d_{ij})=1(相当于 0.13 m/s)、β_{ij}(ω, d_{ij})=0.923(相当于 0.12 m/s)、β_{ij}(ω, d_{ij})=0.846(相当于 0.11 m/s)施加在模型的底面。同时施加的地震波相位差为 π/3 3 种波的相位差见图 2。

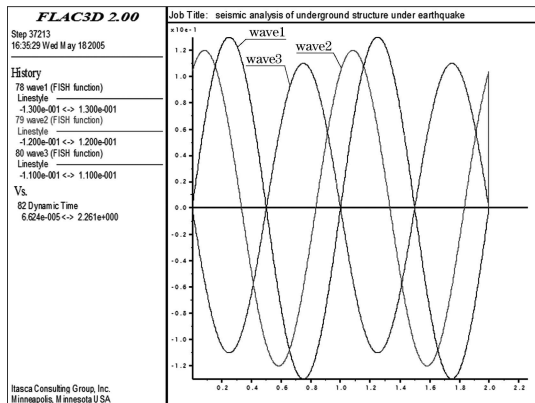


图 2 施加的非均匀地震荷载速度时程

3 计算结果及分析

3.1 埋深的影响分析

图 3 为地应力侧压系数 $\lambda=2$ 埋深为 100 200 300 500 1000 m 时的马蹄形、矩形、圆形断面洞室拱顶、拱底的位移变化规律。可以看出, 在均匀地震荷载下洞室位移响应大于地震荷载非均匀情况; 随埋深的增加, 地震荷载的空间非均匀性对洞室的影响呈减小趋势。分析结果还表明, 在侧压系数 $\lambda=2$ 时, 地震荷载的空间非均匀性对浅埋洞室 (埋深 < 300 m) 影响较为明显, 当埋深超过 300 m 时, 地震荷载的空间非均匀性对洞室的影响很小。可见深埋情况下地震荷载空间非均匀性对洞室的影响小于浅埋洞室。因此, 对于浅埋洞室而言, 应重视地震荷载的空间非均匀性对洞室的影响。

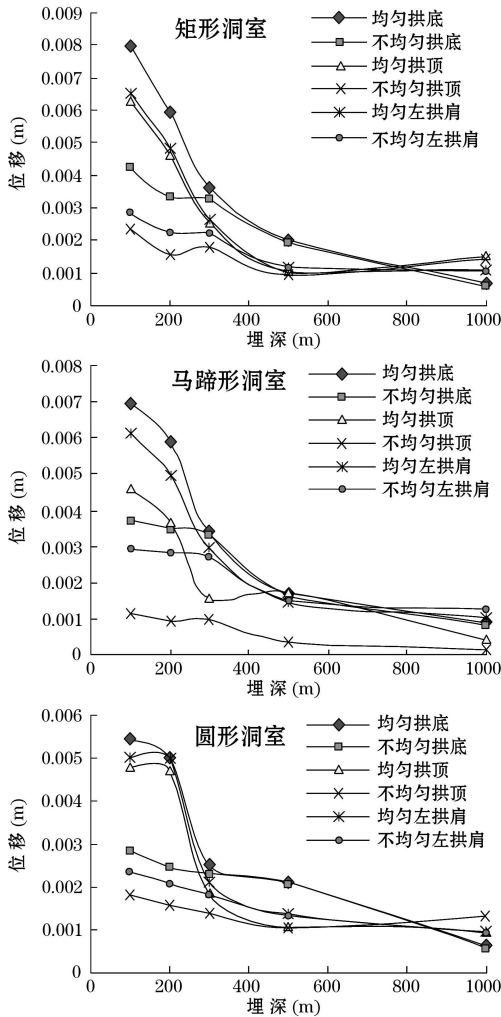


图 3 测点位移与埋深的关系 ($\lambda=2$)

3.2 地应力的影响分析

图 4 为埋深为 200 m, 地应力侧压系数 $\lambda=0.5$

2 3 4 时的马蹄形、矩形、圆形断面洞室拱底、拱顶测点位移随地应力侧压系数变化规律。可以看出, 均匀地震荷载作用下洞室响应大于非均匀地震荷载情况; 侧压系数 $\lambda < 1$ 时, 空间非均匀性地震荷载对洞室的影响较侧压系数 $\lambda > 1$ 时明显。同时, 地震荷载空间非均匀性对洞室位移的影响随地应力侧压系数的增加有减小的趋势。模拟还发现, 对于较均匀的介质, 相对于均匀地震荷载情况, 地震荷载非均匀性会造成洞室不同部位的应力、位移重分布, 造成洞室的局部异常破坏。

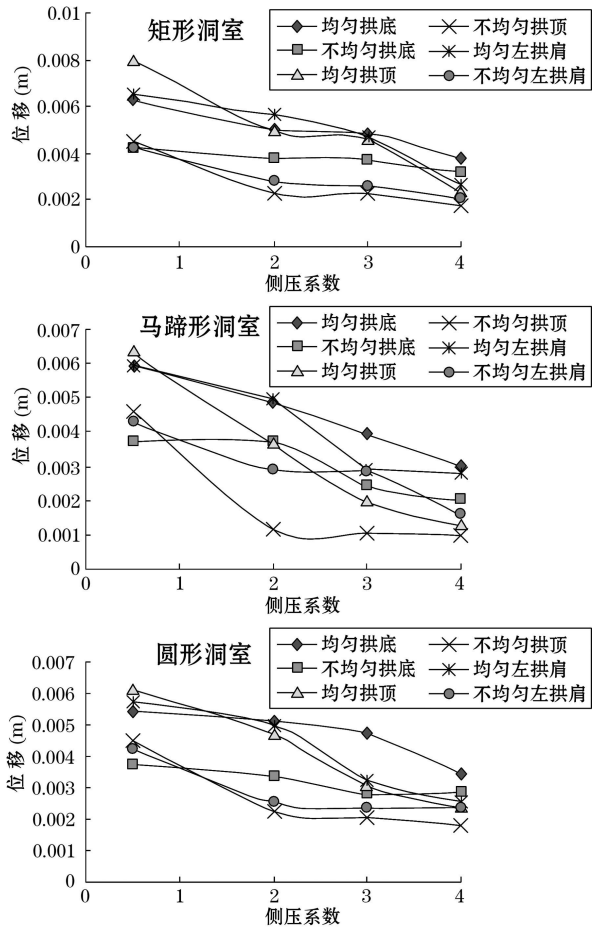


图 4 测点位移与地应力的关系 (埋深 = 200 m)

4 结论与建议

本文采取多面输入地震波法, 利用 FLAC^{3D} 模拟分析了空间不均匀性地震荷载下地下岩体洞室随埋深、地应力岩体洞室位移特征的影响规律, 结果表明:

(1) 随埋深的增加, 地震荷载空间非均匀性对洞室的影响呈减小趋势。深埋情况下地震荷载空间非均匀性对洞室的影响小于浅埋洞室;

(下转第 41 页)

表 10 焙烧温度对有机物去除的影响

温度(°C)	颜色	浸出率(%)	温度(°C)	颜色	浸出率(%)
不焙烧	黑	59.35	450	浅棕	61.38
300	黑	65.32	500	黄	59.72
400	棕	62.43	530	黄	59.84

4 结 论

(1) 该类型铀矿石的铀金属含量非常低,只有 0.07%,但碳酸盐的含量很高, CO_3^{2-} 的含量在 50% 以上,且有机物的含量为 2.6%。虽然采用硫酸搅拌浸出时,铀的浸出率在 90% 以上,但酸的消耗达到 775 kg/t。显然采用酸法浸出从经济上和环保方面难以承受。因此,推荐采用碳酸盐碱法浸出。

(2) 该矿石是一种难处理的矿石,在常温常压下用碳酸盐进行搅拌浸出,铀的浸出率只有 65%,有机物容易进入浸出液中。对原矿而言,加入氧化剂对提高铀的浸出率有提高但提高的幅度不大。不同条件下的实验研究结果表明:不同的浸出剂及配方的对比实验,认为 45 g/L Na_2CO_3 + 15 g/L NaHCO_3 的配比作为溶浸液效果最好。

(3) 在 500 ~ 530°C 之间焙烧能有效地去除矿石中的有机物,从而去消除有机物对浸出液的玷污和对矿石中矿物浸出的影响。在 300 ~ 500°C 之间,随焙烧温度的升高,铀的浸出率降低了,需要加入氧化剂加以补救。综合来看,选择 500 ~ 530°C 作为焙烧温度是可行的。

(4) 在 80 ~ 85°C 常压的条件下,碱法搅拌浸出时,铀的浸出率可达 80% 以上。与室温条件下相比,提高了 15% 左右。这表明浸出温度是影响浸出的关键因素之一。如果要得到更高的浸出率,必须采取强化浸出措施。

(5) 该矿石经过焙烧、加温碱法浸出可以取得比较好的浸出效果,得到了满意的结果,找到了从这种低品位碱性铀矿石中浸出铀的有效方法,为下一步堆浸浸出试验研究提供了依据。

参考文献:

- [1] 曾毅君,牛玉清. 中国铀矿冶生产技术进展综述[J]. 铀矿冶, 2003 22(1): 24 ~ 27.
- [2] IAEA. Manual on Laboratory Testing for Uranium Ore Processing [J]. IAEA Technical Reports Series No 313 Vienna 1990.
- [3] Merritt R C. Extractive Metallurgy of Uranium. Golden Colorado School of Mines Res[M]. Inst, 1971.
- [4] Schortman W E, DeSesa M A. Kinetics of the Dissolution of Uranium Dioxide in Carbonate - Bicarbonate solutions [J]. In Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Use of Atomic Energy Geneva 1958.
- [5] Asmund G, Lundgard T, Sphrensen et al. Sulphating Roasting A Way to Solubilize Uranium in Refractory Minerals [J]. In The Recovery of Uranium (Proc. Symp São Paulo 1970), IAEA, Vienna 1971.
- [6] Halpern J. Effect of Roasting on Recovery of Uranium and Vanadium from Camotite Ores by Carbonate Leaching Trans [J]. Met Soc AIME 1958 212: 65 ~ 70.
- [3] Hao H. Multiple - station ground motion processing and simulation based on smart array data [J]. Nuclear Engineering and Design 1992 III: 293 ~ 310.
- [4] Yanazaki Y. Spatial variation study on earthquake ground motion observed by the chiba array [J]. Tenth World conference on earthquake Engineering Madrid Spain 1992 651 ~ 656.
- [5] 赵风新,胡聿贤. 地震动相位差谱的统计规律 [J]. 自然灾害学报, 1995 (4): 49 ~ 56.
- [6] 李小军,赵风新. 空间相关地震动场模拟的研究 [J]. 地震学报, 1997 19(2): 212 ~ 215.
- [7] 李小军,赵风新. 埋设管网系统地震危险性分析方法 [J]. 自然灾害学报 1995 (4).
- [8] 金星,陈超. 震源对地震动空间相关性影响的定量研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2000 20(1): 1 ~ 10.
- [9] 金星,廖振鹏. 地震动随机场的物理模型 [J]. 地震工程与工程振动, 1994 14(3): 11 ~ 19.
- [10] FLAC 3D (Fast Lagrangian Analysis 3 D in 3 dimensions) user's manual [R] Version 2.0 Itasca Consulting Group Inc, 1995.
- [11] 陈健云,胡志强,林皋. 超大型地下洞室群的随即地震响应分析 [J]. 水利学报, 2002 (1): 71 ~ 75.

(上接第 27页)

(2) 地震荷载空间非均匀性对洞室位移的影响随地应力侧压系数的增加有减小的趋势。侧压系数 $\lambda < 1$ 时空间非均匀性荷载对洞室的影响较侧压系数 $\lambda > 1$ 时明显;

值得指出的是,由于模型尺寸较小,同时仅考虑了均匀介质中行波效应造成的荷载在相位和峰值上的微小差异,所以,分析结果只是一种尝试。可以预见的是,对于大尺寸岩体洞室,同时考虑由于地形地貌、地质构造以及地震波传播的随机性引起的地震荷载非均匀性会对地下洞室产生较大的影响。

参考文献:

- [1] 冯启民,胡贤. 空间相关地面运动的数学模型 [J]. 地震工程与工程振动, 1981 1(2): 1 ~ 8.
- [2] Abrahamson N A. Generation of spatially incoherent strong motion time history [J]. Tenth World Conference on Earthquake Engineering Madrid Spain 1992, 845 ~ 850.