

文章编号: 1673-0836(2006)01-0083-04

动参数对三维洞室动态特性的影响分析*

马行东^{1,2}, 李海波¹, 冯海鹏¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;

2. 国家电力公司成都勘察设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 尝试用 FLAC 有限差分软件对横震动荷载下三维洞室的一些动态影响因素(幅值、频率、持续时间等)进行了模拟, 并进行了三维动力特性分析, 初步了解不同影响因素地震动荷载下的洞室动态特性规律。同时初步分析结果表明, 在横震荷载作用下, 洞室位移随振幅、持续时间的增加而增大, 洞室位移随频率的增加先增加后减小。分析有助于我们增加对动荷载下地下洞室围岩的变形和破坏机制的认识。

关键词: 动荷载; 动力分析; 数值分析

中图分类号: TU93; TB115

文献标识码: A

Analysis of Dynamic Paramaters for Underground Excavation Under Seismic Loading

MA Xing-dong^{1,2}, LI Hai-bo¹, FENG Hai-peng¹

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

2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC(CHIDI), Chengdu 610072, P. R. China)

Abstract: The seismic responses under earthquake is stimulated by finite difference program FLAC under different dynamic loading factors (swing, frequency, duration) and the characteristics of underground excavation are analyzed in this paper, so as to obtain primarily rules of different influencing factors of seismic responses of tunnel under it. It is reported that the displacements of rock cavern clearly increase with increasing earthquake amplitudes and duration time. It is of help to understand the mechanism of deformation and failure of underground excavation in rock mass.

Keywords: dynamic loading; dynamic analysis; numerical analysis

1 引言

地震因其突发性和巨大破坏力被列为各种自然灾害之首。如 1976 年唐山大地震, 死亡人数达 24 万人。地震作用造成的地下工程的破坏也是地震作用下的主要灾害之一。如 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^[9]。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, 整个隧洞遭到破坏。随着我国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营建, 工程项目大部分处于较高地震烈度区, 如溪洛渡水利枢纽工程坝区的地震基本烈度为 VIII 度。同时受地形地貌条件和其他各种因素的影响, 许多大型水电站多选择地下厂房型式。在地震荷载作用下这些大型地下岩体结构稳定性是工程建设迫切要求解决的难点问题。

文献[1. 2. 3]用有限元对上部隧道三维洞口腔、隧道洞体进行研究, 研究了边界约束条件、激震方向、阻尼系数、横向宽度、抗震缝等对洞室动态特性的影响进行了一些分析; 文献[5. 6]分别用离散

* 收稿日期: 2005-03-31(修改稿)

元、边界动力元进行了洞室的二维动态分析;文献[7,8]分析了静态状况下FLAC在隧道中的应用;文献[9]用有限元对溪洛渡水电站进行了动态分析。可以看出对三维地下洞室的动态特性分析还不完善、动态规律的认识还有待深入,因此为了探讨地震波影响因素下三维地下洞室的动态特性规律,本文对横震动荷载下三维洞室做了一些尝试性的探讨。

2 计算模型、力学指标与影响因素

2.1 计算模型及约束条件

数值模拟分析中计算区域取为 $100\text{ m} \times 40\text{ m} \times 150\text{ m}$, X、Y、Z为右手旋转坐标系。开挖的断面形状为马蹄形,洞室埋深为 50 m ,马蹄形断面上部尺寸为半径 5 m 的半圆,下部为 $5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的矩形。采用理想弹塑性模型,采用块体单元。模型约束条件为模型上表面为自由面,底面、侧面均采用粘滞边界约束^[10],以减少动荷载作用下边界反射波的影响。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:

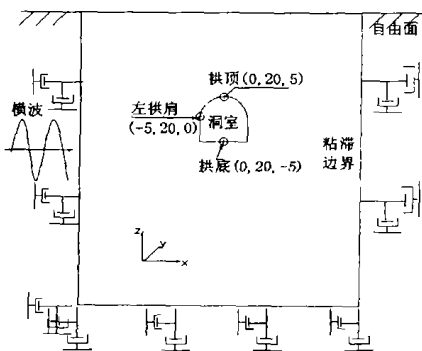


图1 计算模型

Fig.1 Model of computing

2.2 岩体物理力学指标

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,本次数值模拟中模型介质凝灰岩^[11]采用静态参数,各项物理力学指标见表1所示。

2.3 动荷载、阻尼系数及地应力

模拟的地震波为施加在模型左侧面的横向入射波即沿X轴正方向激震,其加速度时程为正弦波: $a = \alpha \cos(2\pi ft)$ 。在粘滞边界动态中,加速度不能直接作用在模型粘滞边界,而要转换成力作用在模型上^[10],转换的公式为式(1):

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) \int a \quad (1)$$

数值模拟考虑阻尼的影响,本模型采用局部阻尼,阻尼系数为0.1;模型考虑自重、地应力的影响;地应力随深度而线性变化,垂直应力为水平应力的两倍。动力参数影响因素见表2:

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)	3000
弹性模量 E_r/GPa	5.6
体积模量 K_r/GPa	2.0
剪切模量 G_r/GPa	1.0
泊松比	0.18
粘聚力/ MPa	1.0
摩擦角/ $^\circ$	35
抗拉强度/ MPa	1.0

表2 影响因素及其条件设置

Table 2 Affecting factors and conditions setting

影响因素	条件设置
振幅 α	$0.31\text{ m/s}^2, 0.62\text{ m/s}^2, 1.25\text{ m/s}^2, 2.5\text{ m/s}^2$ 相当于 V、VI、VII、VIII 烈度地震加速度幅值
频率 f	$0.1\text{ Hz}, 1\text{ Hz}, 2\text{ Hz}, 5\text{ Hz}, 10\text{ Hz}$
持续时间 t	$1\text{ s}, 2\text{ s}, 5\text{ s}, 10\text{ s}, 20\text{ s}$

3 计算结果与分析

3.1 振幅的影响

为探讨动力输入的振幅对洞室动力响应的影响, α 分别取 $0.31\text{ m/s}^2, 0.62\text{ m/s}^2, 1.25\text{ m/s}^2, 2.5\text{ m/s}^2$,而波的频率采用低频 1 Hz 、持续时间为 2 s 来研究横震下振幅的影响。图2、图3为不同振幅下的位移、时程曲线图:

由图2、图3横震下测点的位移变化曲线以及时程变化曲线可以看出在弹性范围内随振幅的增加,测点位移呈线性增加,同时随振幅增加横向位移变化明显,而纵向变化最小,因此动荷载输入方向对洞室响应有较大的影响。对位移、速度、加速度的等值线图可以看出:振幅参数导致位移、速度、加速度呈倍数改变,而其分布形式则变化不大,但破坏区域增加。因此,弹性条件下,洞室的动态响应随振幅的增大大体呈线性变化。

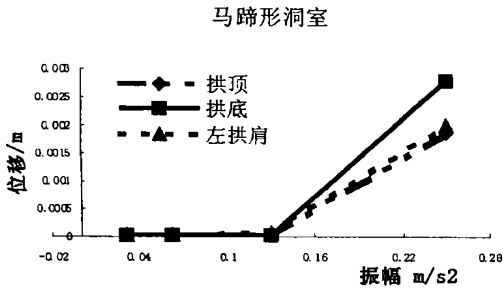


图 2 随振幅测点位移变化曲线图

Fig. 2 Variation curve of point displacement with swing

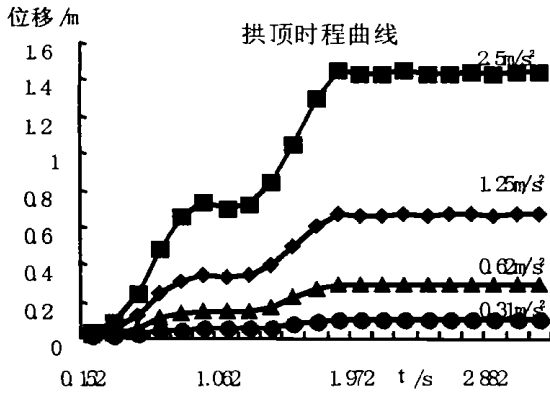


图 3 不同振幅拱顶 GP(0, 20, 5)位移时程曲线

Fig. 3 History of displacement Gp(0, 20, 5) VS step time with different swing

3.2 频率的影响

地震的频率较集中于低频, 对长周期结构物有较大的影响。为探讨频率对洞室响应的影响, 分别取 $f=0.5 \text{ Hz}$ ($1 \text{ Hz} \cdot 2 \text{ Hz} \cdot 5 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ Hz}$), α 取 0.31 m/s^2 、持续时间 t 取 2 s 来研究横震下频率的影响。图 4、图 5 为不同频率下的位移变化曲线、拱底位移时程曲线图:

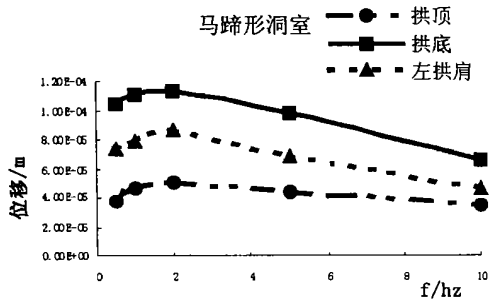


图 4 随频率测点位移变化曲线图

Fig. 4 Variation curve of point displacement with frequency

由图 4 可以看出在横震荷载低频作用下测点位移随频率的增加先增加后减小, 发生共振的频率较小。由于岩体的自振频率较小, 因此对于低频的

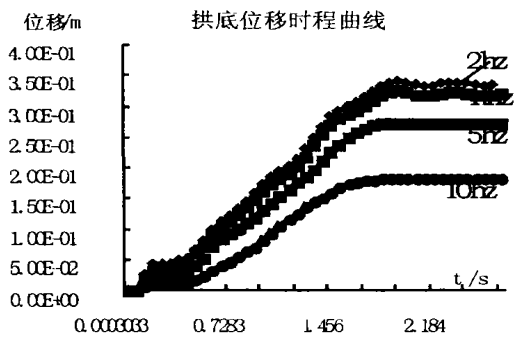


图 5 不同频率拱底位移时程曲线

Fig. 5 History of displacement Gp(0, 20, -5) VS step time with different frequency

岩体而言可能发生共振效应。由于每种介质都有固定的自振频率, 在介质自振频率和地震波频率接近的情况下达到共振, 此时洞室的响应破坏也最明显, 洞室破坏最强。小于介质自振频率情况下, 随地震波频率的增加洞室响应呈增加趋势, 洞室破坏增强; 超过介质共振频率, 洞室响应随频率的增加而减小。

3.3 持时的影响

我们知道地震的持续时间是地震动工程特性的重要因素, 从震害实例看出地震动持时是结构破坏的重要因素, 可以发生积累破坏, 可以看出持时对地下洞室动态响应以及洞室破坏有重要影响, 因此取 1 s 、 2 s 、 4 s 、 10 s 、 20 s , 而波的频率为 1 Hz 、幅值大小为 0.31 m/s^2 来研究横震下持时的影响。图 6 为不同持时下的位移曲线变化图:

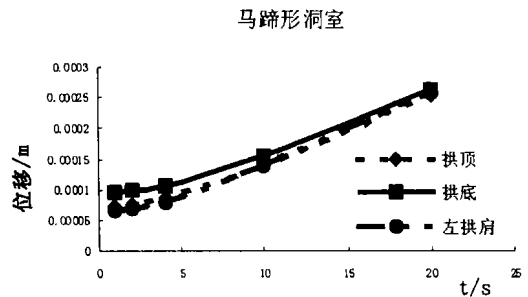


图 6 随持时测点位移变化曲线图

Fig. 6 Variation curve of point displacement with duration

对比不同持续时间下的洞室的动力响应, 洞室响应随持时的增加而增加。可见随着地震的累积效应, 随着持续时间的增加, 洞室受到的动荷载影响程度越来越大, 洞室的动态响应越强, 随着持续时间的增加, 洞室的破坏也越明显。

3.4 横向激震下断面变形

由横向激震下模型数值分析可以看出 X 向位

移变化较大,Z向次之,而Y向最小。振幅、频率及持续时间下的横震模拟都发现:横向地震动作用下地下洞室可能会产生较大的水平剪力和弯矩。横震作用下洞室的侧壁受张性力,侧壁容易发生张性破坏,因此横震下侧壁稳定威胁最大,侧壁的动态响应也较明显。可见地震波的入射方向对洞室的动态响应有较大影响。对洞室横震下的断面受力分析可以看出断面形状变化大致如图7。

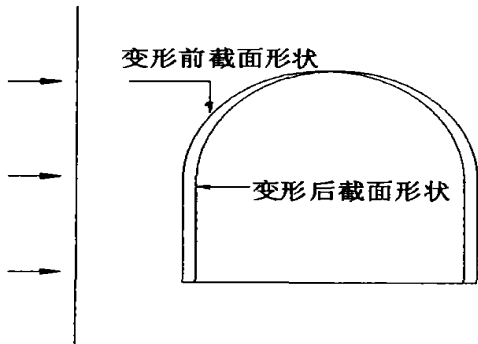


图7 横震断面变形

Fig.7 Distortion of the section under h-shaking

4 结论与建议

本文利用FLAC初步分析了地震荷载作用下地震波参数包括振幅、频率以及持续时间对地下岩体洞室位移特征的影响,通过以上分析得出:

- (1)地震波的入射方向对洞室的动态响应有较大影响,横震下侧壁稳定威胁较大;
- (2)弹性极限内,洞室的动态响应随振幅的增大而呈线性增加;
- (3)洞室响应随频率的增加先增加后减小,在周期较长、频率较小的情况下,将引起长周期结构物的巨大破坏,发生共振破坏;
- (4)随着持续时间的增加,洞室受到的动荷载影响程度越来越大,洞室的动态响应越强,洞室的破坏也越明显;
- (5)动力输入参数(振幅、频率、持续时间)对洞

室响应分布有不同的影响,频率对洞室响应的分布作用最大,振幅、持续时间对洞室响应的分布影响不大,但对破坏程度影响较大。

本文仅考虑了一些因素如幅值、频率、持续时间在横震动力输入参数下洞室的响应,没有考虑铅直、纵向及斜入射下动力输入参数下洞室的响应。另外没有考虑节理、断层引起的地震波的空间不均性传播,没有考虑介质的非线性、各项异性等因素的影响。因此对地震动荷载下地下洞室的动态特性规律分析还需要做进一步的探讨。

参考文献:

- [1] 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,vol.20 No.4 July 1998
- [2] 李祖德,高峰.隧道洞口段三维地震反应分析[J].兰州铁道学院学报,vol.17 No.2 July 1998
- [3] 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,1998.3(1)18
- [4] 金峰,贾伟伟,王光纶.离散元、边界元动力耦合模型[J].水利学报,2001.1 一期
- [5] 金峰,贾伟伟,王光纶.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 二期
- [6] 杨新宏,黄宏伟.FLAC程序及其在隧道工程中的应用[J].上海铁道大学学报,vol.17 No.4 Dec. 1996
- [7] 包太,刘新荣.地下洞室与其上部地基相互作用的FLAC分析[J].贵州工业大学学报,vol.31 No.6 Dec. 2002
- [8] 陈健云,胡志强,林皋.超大型地下洞室群的三维地震响应分析[J].岩土工程学报,vol.23 No.4 July 2001
- [9] W.L. Wang T.T. Wang Assessment of damage in mountain tunnel due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake Tunnel and Underground Space Technology 16 (2001) 13
- [10] FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis 3 Dimensions) user's manual, Version 2.0. Itasca Consulting Group, Inc., 1995
- [11] 夏祥,李俊如.爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J].岩土力学,2005

(上接第82页)

- [11] J.Lemaitre. How to use damage mechanics[M]. Nuclear Engineering and Design. 1984
- [12] Krajcinovic D.,Silva M.A.G., Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. Int. J. Solids Structures, 1982, 18(7):551~562

- [13] 唐春安.岩石破裂过程中的灾变[M].北京:煤炭工业出版社,1993
- [14] Evgin E, Fakharian, K. Effect of stress paths on the behavior of sand-steel interfaces[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(6):853-865