

文章编号: 1000-7598 (2012) 10-2897-07

# 地震荷载作用下地下洞室 不利地质结构塌落机制研究

王 帅<sup>1</sup>, 盛 谦<sup>1</sup>, 朱泽奇<sup>1</sup>, 肖培伟<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610041)

**摘 要:** 目前地下结构地震动力分析主要研究围岩响应特征, 对围岩中赋存的岩体结构的动力响应规律、塌落机制还缺乏深入研究。结合大岗山水电站工程地下洞室群, 基于块体理论选取 3 种不利地质结构组合作为地下洞室群动力分析的主要结构形式, 接着运用离散元程序 UDEC 研究两种地震工况作用下不同不利地质结构组合切割的地下洞室围岩动力响应、变形特征以及节理的张开、滑移特征, 分析开挖面附近块体的塌落机制。研究表明, 陡倾角结构面切割形成不利地质结构对地下洞室围岩变形破坏机制影响较大; 在地震荷载作用下, 陡倾不利地质结构沿节理面的滑塌具有突发性, 并且塌落模式随地震强度增加可能发生变化。

**关 键 词:** 地下洞室群; 不利地质结构; 地震荷载; 离散元; 节理; 塌落形式

**中图分类号:** U453.2

**文献标识码:** A

## Study of collapse mechanism of underground caverns with unfavorable geological structures under seismic loading

WANG Shuai<sup>1</sup>, SHENG Qian<sup>1</sup>, ZHU Ze-qi<sup>1</sup>, XIAO Pei-wei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Daduhe Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Seismic response of rock is the main topic in current dynamic analysis of underground structures, but the dynamic response and collapse mechanisms of rock structures are lack of thorough study. Based on a practical hydropower project, three kinds of unfavorable geological structures are selected in the dynamic analysis of large underground caverns by using block theory. Then ground deformation history and characteristics of open and slip joints are studied under seismic loadings by a discrete element program UDEC. Simultaneously the movement mechanisms of the cutting blocks are also analyzed. The results show that steep dip geological structures have greater impact on earthquake response of underground caverns. Under the seismic loading, adverse geological structures slip along the steep incline joint with sudden. Collapse form of adverse geological structures may change with seismic load increasing.

**Key words:** underground caverns; unfavorable geologic structure; seismic loading; discrete element; joint; collapse form

## 1 引 言

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营建。我国西南地区总体上处于青藏高原的周边地带, 地震基本烈度多在Ⅶ度或Ⅶ度以上, 断层、岩脉、节理等不利地质结构极其发育。这些结构面很大程度上决定了地下洞室

的破坏机制和稳定性。即使开挖后, 地下洞室达到暂时的平衡和稳定, 在地震动作用下也可能失稳和破坏。众多震害资料表明, 地震动力易诱发滑坡、洞室坍塌等岩体失稳灾害<sup>[1-7]</sup>, 文献[5-7]更是强调岩体结构的存在对地下洞室地震震害的重要影响, 指出不利地质结构的滑动、坍塌导致地震震害程度普遍较大。因此, 研究不利地质结构的动力响应特

收稿日期: 2011-06-24

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(No. 90715042); 国家自然科学基金项目(No. 51009130); 国家科技支撑计划课题子题(No. 2006BAB04A06); 湖北省自然科学基金项目(No. 2010CDB11102)。

第一作者简介: 王帅, 男, 1986 年生, 博士, 主要从事大型地下洞室群地震稳定的研究工作。E-mail: wsswjtu@qq.com

征及其切割形成块体的塌落机制对确保地下洞室安全运营具有重要意义。

当前在节理岩体中常用的地下结构地震分析方法主要有连续、非连续数值方法。有限元、有限差分法等连续数值方法将节理岩体视为等效连续体,可考虑岩体、地应力的各向异性,已成为岩土工程静动力分析中最重要的分析方法之一。陈键云等<sup>[8-9]</sup>采用三维有限元法进行了溪洛渡超大型地下洞室群的地震响应分析,李海波等<sup>[10-11]</sup>采用有限差分法对地下洞室地震响应主要特征和影响因素进行了系统分析。但在节理控制破坏的岩体中,这种等效分析方法就不能准确反映岩体变形特征<sup>[12-13]</sup>。非连续数值方法中的离散元法、DDA方法将完整岩石和节理分开考虑,可反映节理岩体中节理滑动张开及块体塌落。Bardet等<sup>[14]</sup>、陶连金等<sup>[15]</sup>先后将二维离散元应用于节理岩体地下洞室的地震响应问题;刘君等<sup>[16]</sup>应用DDA程序模拟了节理岩体中隧洞开挖的过程以及地震荷载作用下隧道围岩的动力响应。综上所述,目前针对地下结构地震动力分析主要研究围岩响应特征及破坏过程,对围岩中赋存的岩体结构的动力响应规律、塌落机制还缺乏深入研究。

本文以大岗山水电站地下洞室群为例,首先基于块体理论统计分析关键块体与其切割结构面关系以选取几组主要不利地质结构组合。进一步采用离散元程序 UDEC 分析地震荷载作用下不同不利地质结构组合切割地下洞室围岩动力响应、变形特征以及节理的张开、滑移特征,分析开挖面附近块体的塌落机制。

## 2 工程背景

大岗山水电站坝址位于四川省大渡河中游上段雅安市石棉县挖角乡境内。地下厂房系统由主机间、主变室和尾调室 3 大洞室组成,按“一”字型平行布置,岩柱厚度均为 47.50 m,轴线方向为 N55° E。主厂房的开挖尺寸为 206.00 m×30.80 m×73.78 m(长×宽×高),主变室开挖尺寸为 144.00 m×18.80 m×25.10 m(长×宽×高)。工程区位于 SN 向、NW 向和 NE 向多组断裂构造交汇部位,地震地质背景复杂,新构造活动较强烈,地震基本烈度为 VIII 度。不仅如此,工程区域节理极其发育,在地下厂房区 A 段、B 段、C 段所揭露的主要节理,其产状见表 1。

表 1 地下厂房节理产状  
Table 1 Joints of underground powerhouse

部位	产状/(走向/倾向/倾角)
A 段	N15°~25°E/SE∠28°~40°,EW/S(N)60°~80°,N50°~60°E/NW∠20°~30°,N20°~40°W/NE∠28°~38°,SN/E∠60°~90°
B 段	N15°~25°E/SE∠28°~40°,EW/S∠25°~35°,N50°~60°E/NW∠80°,N50°~70°W/SW∠76°,EW/S(N)∠60°~80°
C 段	EW/N(S)∠60°~85°,EW/S∠25°~35°N50°~70°W/SW∠76°,N15°~25°E/SE∠28°~40°,N20°~40°W/NE∠28°~38°

本文依据地下厂房区各段开挖揭露的节理产状信息,通过块体理论分析,得到可与洞室开挖面切割形成不稳定块体的节理面组合。依次按形成不稳定块体数目、大小进行分类,地下厂房区 A、B、C 段较不利的节理面组合形式如图 1 所示。经对块体切割形态进行统计,得出 3 种主要结构面组合形式,见表 2。本文将以此 3 种地质结构组合作为地下洞室群二维动力分析的主要结构形式。

表 2 不利地质结构组合

Table 2 Combinations of adverse geological structures

组合	节理组 1		节理组 2	
	倾向/(°)	倾角/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)
1	145	22~27	325	43~47
2	145	21~28	325	77~83
3	325	45~55	145	64~68

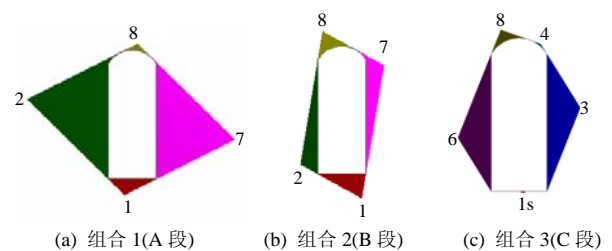


图 1 不利地质结构组合示意图

Fig.1 Combinations of adverse geological structures

## 3 离散元计算模型

### 3.1 模型范围与计算条件

图 2 为考虑不利地质结构的地下洞室群离散元计算模型,模型高约为 1 500 m,宽为 600 m,地下洞室群埋深为 420~500 m,自左向右依次为主厂房、主变室、尾调室。模型 Y 轴为铅直方向,向上为正,X 轴与厂房轴线垂直,向右方向为正,Z 轴

沿厂房轴线，由里指向外为正。为提高动力计算效率，仅在距洞室开挖面 100 m 范围内设置节理模型，将该区域的围岩视为“岩石”与结构面的组合。按表 2 中不利地质结构组合设计 3 种方案，节理间距为 4 m，相应的节理分布模型见图 3。岩体采用摩尔-库仑本构模型，节理采用库仑滑移模型(Coulomb slip model)，相关力学参数取值见表 3。

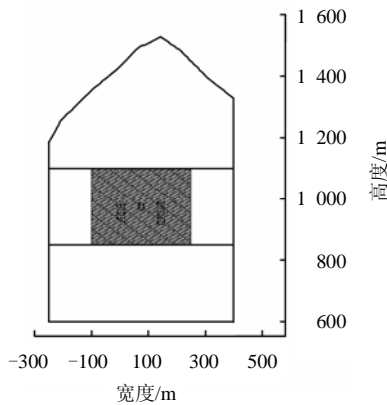
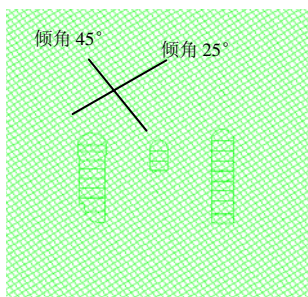
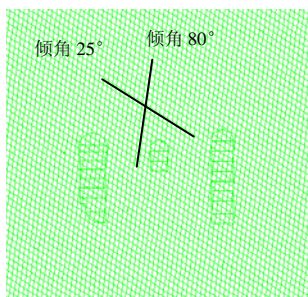


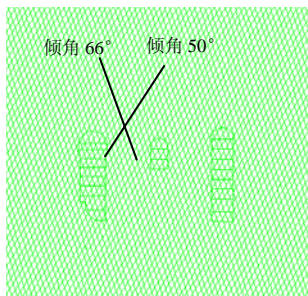
图 2 地下洞室群计算模型  
Fig.2 Calculation model of underground caverns



(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3

图 3 节理分布模型  
Fig.3 Joint distribution models

表 3 岩体节理参数

Table 3 Mechanical parameters of rock joints

材料	密度 (g/m <sup>3</sup> )	弹性 模量 /GPa	泊松比	内摩 擦角 /(°)	凝聚力 /MPa	抗拉 强度 /MPa	法向 刚度 /(GPa/m)	切向 刚度 /(GPa/m)
岩体	26.5	25.0	0.25	55	3.0	0.1		
结构面				50	0.1	0	18.0	7.0

### 3.2 地震荷载与边界条件

进行动态响应分析时，将截断边界设为黏性边界，在模型底部施加垂向入射的剪切波。输入地震动采用阪神主震水平向加速度时程，图 4 为其经高频滤波和基线校正后的时程曲线。根据工程地震学原理，设定 2 种计算工况，分别对应 50 a 超越概率 63% 和 50 a 超越概率 10% 的地震烈度，电站地震烈度危险性和基岩峰值加速度见表 4。

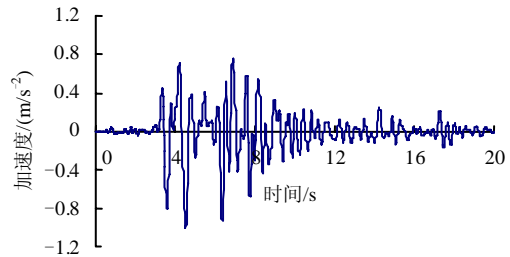


图 4 阪神主震水平向加速度-时程曲线  
Fig.4 Horizontal acceleration history of Kobe main shock

表 4 水电站烈度危险性表

Table 4 Seismic intensity of a hydropower station

周期	50 a 超越概率/ %				100 a 超越概率/ %
	63	10	5	2	2
PGA	61.5	251.7	336.4	404.3	557.5

注：PGA 为水平峰值加速度，单位为 gal，1gal=1cm/s/s。

## 4 计算结果分析

### 4.1 开挖计算分析

图 5 为各方案洞室群开挖后位移矢量及节理变形图，线条粗细表示节理位移的相对大小，最小刻度 15mm。由图知，施工模拟完成后，围岩的变形特征与失稳机制受控于结构面的切割形态。方案 1（缓倾、中倾结构面切割）中，由于结构面倾角较缓，开挖面上仅形成局部小滑体，主要分布在顶拱、边墙与几何形状突变处。方案 2（陡倾 80°、缓倾结构面切割）中，陡倾结构面在左边墙处表现为反倾切割模式时，在该侧边墙切割形成以卸荷回弹变形为主的可动块体；陡倾结构面在右边墙处表现为顺倾切割时，在该侧边墙切割形成下滑体。方案 3（陡

倾 66°、中倾结构面切割)中,两组结构面倾角均超过结构面内摩擦角,在两侧边墙均切割形成较大的滑体。

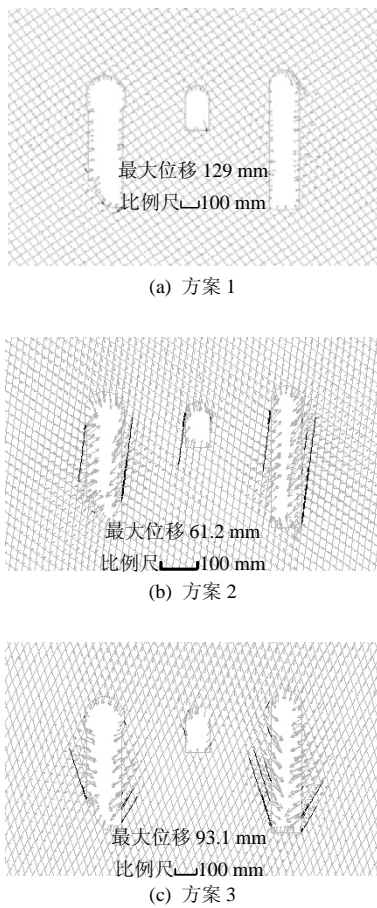


图 5 开挖后围岩位移矢量及节理变形图

Fig.5 Surrounding-rock displacement vector and joint deformation after excavation

进一步将各方案所处洞段主长房附近安装的多点位移计位移监测结果与该计算剖面相应部位的位移进行对比,见图 6。位移实测值与计算值大小在同一个量级,量值相差不大,且随开挖施工过程的变化趋势也基本一致。说明本文的节理简化模型可以反映围岩的主要变形特征与失稳机制。

#### 4.2 围岩地震响应与变形特征

图 7、8 为两种工况下各方案洞室变形结果,位移矢量及节理变形图,黑色线条“—”粗细表示节理位移的相对大小,最小刻度 15 mm。陡倾节理顺倾切割时围岩震害程度相比陡倾节理反倾切割时更大,如方案 2 右边墙处、方案 3 左边墙处围岩相对另一侧围岩变形都明显偏大,这与静力工况下围岩变形特征有所不同。随着地震荷载增大,陡倾结构面切割形成不利地质结构塌落形式可发生改变,如工况 2 下陡倾(66°)与中倾结构面切割方

案 3 尾调室左边墙滑体内部发生明显的震损,表现为边墙中部岩体节理张开,块体松散塌落的趋势。

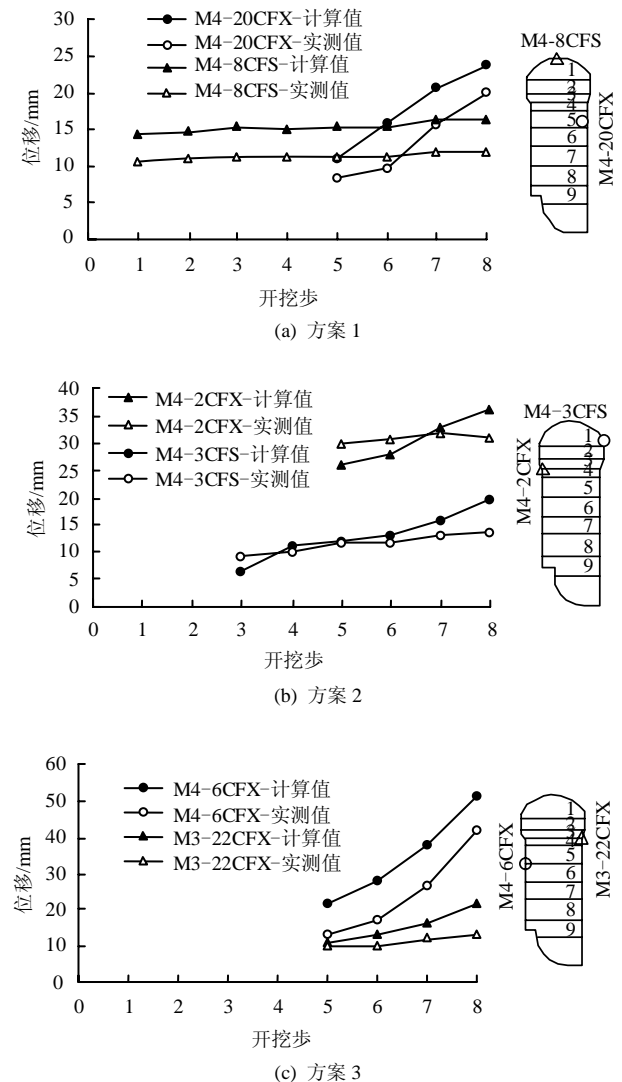


图 6 监测点计算值与实测位移对比

Fig.6 Comparison between calculated and measured displacements of monitoring point

图 9 给出两种工况下主厂房右边墙中部围岩的位移-时间曲线。缓倾角或中等倾角结构面切割围岩震后位移基本恢复,且受地震荷载强度影响较小。对于陡倾(80°)与缓倾结构面切割方案 2、陡倾(66°)与中倾结构面切割方案 3,由于边墙附近滑体的滑动,围岩永久位移和最大位移幅值在工况 2 下相比工况 1 进一步增大。

综上所述,陡倾结构面是地下洞室震害的重要因素,其顺倾切割时洞室震害程度更大;不同大小地震荷载作用下,陡倾结构面切割形成不利地质结构塌落模式可能发生变化。

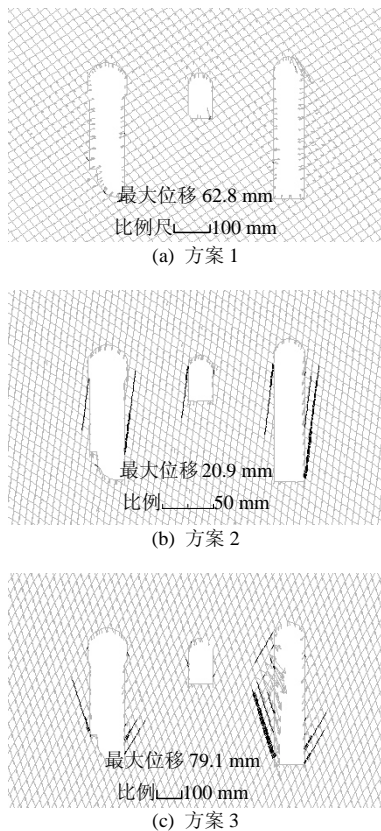


图 7 工况 1 震后围岩位移矢量及节理变形图

Fig.7 Diagrams of surroundings rock displacement vector and joint deformation after seismic loading under condition 1

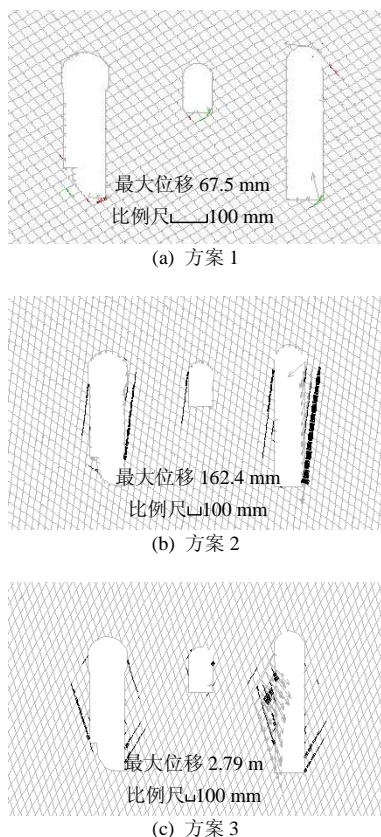


图 8 工况 2 震后洞室群位移矢量及节理变形

Fig.8 Diagrams of surrounding rock displacement vector and joint deformation after seismic loading under condition 2

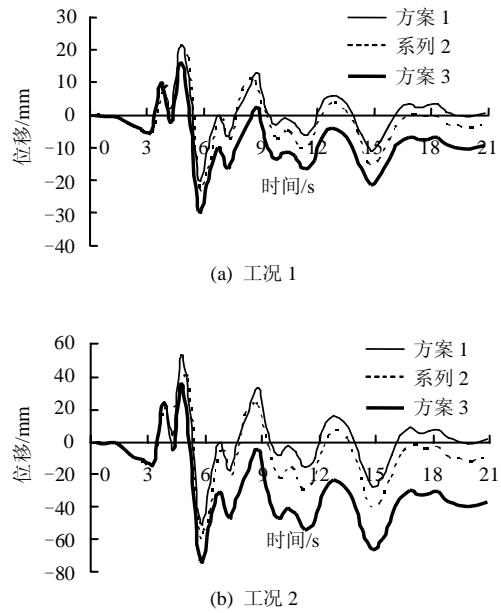


图 9 主厂房右边墙中部水平向位移时程曲线

Fig.9 Horizontal acceleration history of midpoint on the right wall of the main powerhouse

### 4.3 节理地震响应与变形特征

离散单元法相对连续方法一大优点是块体和节理是分开考虑的，因此，可以得到节理面的张开、滑移特征。图 10、11 分别给出两种工况下 3 种方案主厂房右边墙附近滑面上节理剪切、张开位移-时程曲线，方案 1 并没有明显的滑面，其监测点位置取与方案 2 监测点相同高程的点。分析图 10、11 可知：

(1)不利地质结构滑面的剪切变形具有突变性。3 s 左右阪神波加速度达到较大的峰值，方案 2、方案 3 滑面上节理受力达到极限状态，滑面上节理剪切变形突变式增长，随后，节理剪切变形趋于稳定。

(2)地震荷载作用下，不同节理组合滑面的法向变形呈现不同的变形特征。方案 1 滑面上节理法向不断张开闭合，最后滑面法向变形基本恢复；方案 2 滑面上节理法向变形主要为压缩变形；方案 3 滑面上节理法向变形有小幅波动，最后仍有张开变形，其对洞室长期稳定易产生不利影响。

(3)虽地震荷载是一种循环往复荷载，但滑面上变形并没有出现循环剪切特征。

综上所述，地震作用下不利地质结构滑面上位移具有突变性，因此，可通过滑面位移-时程去确定围岩失稳时的地震荷载加速度临界值，代替不同加速度幅值的地震波多次试算。滑面呈现的不同变形特征为加强支护措施提供依据，如在方案 1 中应增加局部围岩抗拉强度，方案 2 中应增加围岩抗剪强度，方案 3 中则应同时增大围岩抗拉和抗剪强度。

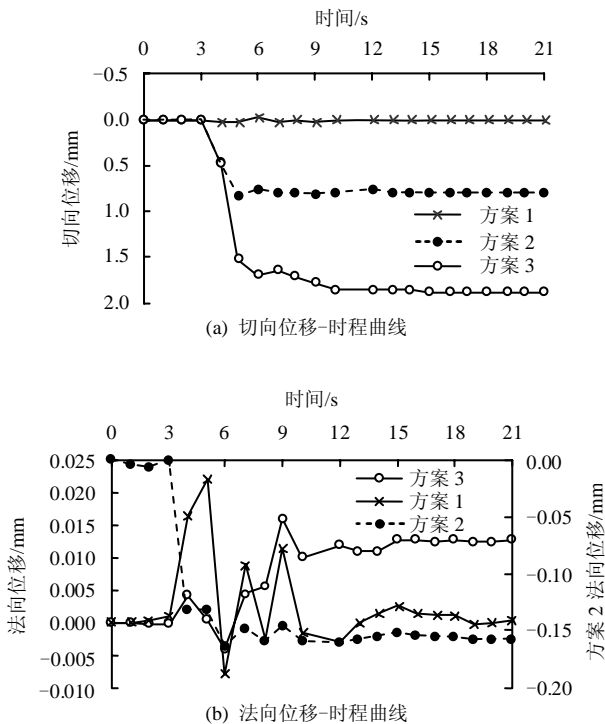


图 10 工况 1 下主厂房右边墙滑面上节理剪切、张开位移-时程曲线

Fig.10 Shear and normal displacement history of the joint on sliding surface near the right wall of the main powerhouse under condition 1

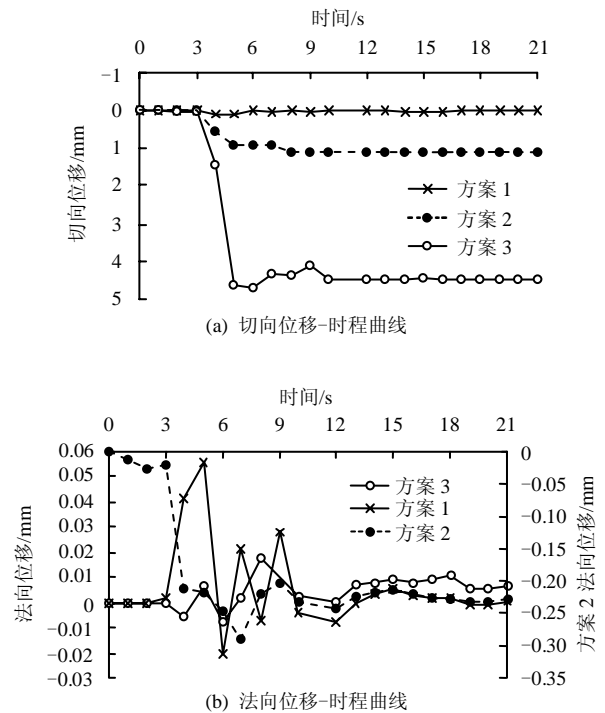


图 11 工况 2 下主厂房右边墙滑面上节理剪切、张开位移-时程曲线

Fig.11 Shear and normal displacement history of the joint on sliding surface near the right wall of the main powerhouse under condition 2

### 5 结 论

(1) 陡倾结构面切割形成不利地质结构对岩体地震变形破坏机制影响较大；当陡倾结构面表现为顺倾切割时不利地质结构动力稳定性较结构面反倾切割时差。

(2) 陡倾结构面切割形成不利地质结构在不同大小地震荷载作用下的塌落模式可发生变化，由小震作用下沿结构面滑动发展到中震下的整体松散塌落。

(3) 不利地质结构滑塌具有突变性，因此可通过其滑面位移-时程用来判断岩体是否失稳以及失稳时的地震荷载加速度临界值，相比采用不同加速度幅值的地震波多次试算的方法具有更高的效率；其滑面呈现的不同变形特征为加强支护措施提供依据。

### 参 考 文 献

- [1] LEE C F. Performance of underground coal mines during the 1976 Tangshan Earthquake[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1987, 2: 199—202.
- [2] WANG W L, WANG T T, SU J J, 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.
- [3] SHARMA S, JUDD W R. Underground opening damage from earthquakes[J]. *Engineering of Geology*, 1991, 30: 263—276.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] ST JOHN C M, ZAHRAH T F. A seismic design of underground structures[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1987, 2(2): 165—197.

- Journal**, 2000, 37, 890—897.
- [7] POULOS H G, CHEN L T, HULL T S. Model tests on single piles subjected to lateral soil movement[J]. **Soils and Foundations**, 1995, 35(4), 85—92.
- [8] 闫金凯, 殷跃平, 门玉明. 微型桩单桩加固滑坡体的模型试验研究[J]. **工程地质学报**, 2009, (05): 669—674.  
YAN Jin-kai, YIN Yue-ping, MEN Yu-ming. Model test study on landslide reinforcement with single micro pile[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(5): 669—674.
- [9] 李寻昌, 门玉明, 何光宇. 锚杆抗滑桩桩侧地层抗力分布模式的试验研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(09): 2655—2659.  
LI Xun-chang, MEN Yu-ming, HE Guang-yu. Test research on strata resistance of pile side of anchor anti-slide pile [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(09): 2655—2659.
- [10] 李寻昌, 门玉明, 王娟娟. 锚杆抗滑桩体系的群桩、群锚效应研究现状分析[J]. **公路交通科技**, 2005, 22(9): 52—55.  
LI Xun-Chang, MEN Yu-ming, WANG Juan-juan. Analysis on researches reality of the effects of pile groups and anchor groups in anchor anti-slide piles[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(9): 52—55.
- [11] LI Xun-chang, MEN Yu-ming. Anchoring depth research of anti-slide piles of anchor bar in soil[J]. **Earth Science Frontiers**, 2009, 16: 182.
- [12] 门玉明, 邓军涛, 李金湘. 锚索抗滑桩设计中几个问题的探讨[J]. **公路交通科技**, 2005, 22(6): 52—54.  
MEN Yu-ming, DENG Jun-tao, LI Jin-xiang. Study on the anchor anti-slide pile [J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(6): 52—54.

---

上接第 2902 页

- [7] CARPENTER D W, CHUNG D C. Effects of earthquakes on underground facilities[R]. [S.l.]: Lawrence Livermore National Lab, 1986: 1—52.
- [8] 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.
- [9] 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**, 2001, 23(4): 494—498.  
CHEN Jian-yun, HU Zhi-qiang, LIN Gao. 3-D seismic response study on large scale underground group caverns[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 494—498.
- [10] 李海波, 马行东, 邵蔚, 等. 地震波参数对地下岩体洞室位移特性的影响分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(增刊): 4627—4634.  
LI Hai-bo, MA Xing-dong, SHAO WEI, et al. Influence of the earthquake parameters on the displacement of rock cavern[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.): 4627—4634.
- [11] 李海波, 马行东, 李俊如, 等. 地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(3): 358—362.  
LI Hai-bo, MA Xing-dong, LI Jun-ru, et al. Study on influence factors of rock cavern displacement under earthquake[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 358—362.
- [12] WITTKE W. Rock mechanics theory and applications with case histories[M]: Berlin: Springer, 1990.
- [13] SITHARAM T G, MADHAVI LATHA G. Simulations of excavations in jointed rock masses using a practical continuum approach[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2002, 39(4): 517—525.
- [14] BARDET J P, SCOTT R F. Seismic stability of fracture rock masses with the distinct element method[C]// Proceedings of 26th U. S. Symp. Rock Mech. Rapid City, 1985: 139—149.
- [15] 陶连金, 张倬元, 傅小敏, 等. 在地震载荷作用下的节理岩体地下洞室围岩稳定性分析[J]. **中国地质灾害与防治学报**, 1998, (1): 33—41.  
TAO Lian-jin, ZHANG Zhuo-yuan, FU Xiao-ming, et al. Stability analysis of surrounding rockmass of underground excavation rock mass under seismic load[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1998, (1): 33—41.
- [16] 刘君, 孔宪京. 节理岩体中隧道开挖与地震作用下围岩的稳定性[J]. **岩石力学与工程学报**. 2005, 24(增刊 1): 4929—4933.  
LIU Jun, KONG Xian-jing. Stability of tunnel in jointed rock masses during excavation and under earthquake load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 4929—4933.