

复杂地质条件下导流洞塌方的离散元法模拟研究

黄志鹏^{1, 2, 3}, 周洪波⁴, 周江平⁴

(1. 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2. 长江科学院 重庆岩基研究中心, 重庆 400014;

3. 锦屏建设管理局 锦屏一级安全监测中心, 四川 锦屏 610000; 4. 二滩水电建设开发有限公司 锦屏建设管理局, 四川 成都 610051)

摘要: 锦屏一级水电站左岸导流洞地质条件非常复杂, 地应力极高, 节理、断层发育, 施工过程中发生了较大规模的塌方。基于离散元法模拟主要节理和断层, 建立计算模型, 通过计算和分析, 得到导流洞围岩的变形破坏规律。导流洞开挖后, 围岩应力释放, 结构面松弛、滑移, 导致围岩边墙首先产生纵向裂缝, 拱顶出现掉块; 随着结构面变形加剧, 边墙沿结构面进一步滑移张开, 拱顶的支撑作用减弱导致坍塌, 计算模拟和实际塌方情况基本一致。

关键词: 导流洞; 高地应力; 节理; 断层; 离散元法; 塌方

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0058-04

Simulation of Collapse by Discrete Element Method for Diversion Tunnel under Complex Geological Conditions

HUANG Zhi-peng^{1, 2, 3}, ZHOU Hong-bo⁴, ZHOU Jiang-ping⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics & Engineering of Ministry of Water Resources,

Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Chongqing Rock Foundation Research Centre, Yangtze River Scientific Research Institute, Chongqing 400014, China;

3. Jinping I Safety Monitoring and Management Center of Jinping Construction Bureau, Jinping, Sichuan, China;

4. Ertan Hydroelectric Development Lt. Company, Chengdu 610021, China)

Abstract: Geological conditions of Jinping I Hydropower diversion tunnel is very complicated, it has the following characteristics, such as high geostress and developmental faults and joints, several collapse occurred in the construction process. A brief introduction is given to the geological conditions of Jinping I Hydropower diversion tunnel, based on discrete element method, Major joints and faults were simulated, and calculation models were built. By calculation and analysis, Rules and characteristics of deformation and failure for rock diversion tunnel has been obtained. After the diversion tunnel was excavated, high geostress were released, structural surface relaxation and slip. Side wall generated vertical cracks, vault take place chipping. With deformation increasing, the structural plane was further slip and open, dome support weakened, leading to collapse.

Key words: High Geostress; Joint; Fault; Discrete Element Method; Collapse

1 离散元法基本原理^[1-3]

离散元法(distinct element method)由美国学者Cundall, P. A.于1971年提出,该方法假定岩体是由大量节理切割的岩块“堆砌”而成(即离散介质),运用牛顿第二定律计算组成边坡的各岩块在自重和外荷载作用下随时间变化的加速度、速度和位移。其基本假定是岩体为离散介质和岩体可以沿节理裂隙等结构面产生滑动、转动等大变形。20世纪90年代,中国学者王泳嘉等引入离散元法,以后该方法又在很多领域中得到深入的探讨与实践。该方法适用于模拟节理系统或离散颗粒组合体在准静态或动态条件下的变形过程,最初用来分析岩石边坡的运动学过程。离散元法是在准刚性假设的前提下,以牛顿运动定律为理论基础建立起来的,它是一种非连续的分析方法。

隧道塌方问题是典型的不连续变形块体的动力学问题,

基于牛顿运动定律的离散元法可充分考虑离散块体之间的滑动、转动、大变形、冒落和层间脱开等运动形态,建立隧道的刚度矩阵、质量矩阵、荷载矩阵等,根据总势能最小原理建立平衡方程,通过求解结构矩阵的方法分析块体系统力与位移的相互关系,能得到大变形,大位移解。

离散元法接触本构关系采用了力~位移关系,并且认为这个关系是可塑的,两块体相互作用的力与接触块体之间的叠合量有关。

法向力 F_n 与法向“叠合” u_n 成正比,即

$$F_n = K_n u_n, \quad (1)$$

式中, K_n 为法向刚度系数。

设两块体之间的相对位移为 Δu_s ,则剪切力 F_s 可用下式计算。

$$\Delta F_s = K_s \Delta u_s, \quad (2)$$

$$F_s = K_s^{old} \Delta u_s + \Delta F_s, \quad (3)$$

由 Mohr-Columb 准则可知,最大切向应力

$$|F_s| \leq c + F_n \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

式中, K_n 、 K_s 分别为接触面上法向和切向刚度系数; u_n 为总的法向位移叠合量; Δu_s 为剪切位移增量; c 为接触点的粘聚力; φ 为接触点的摩擦角。

2 工程概况

锦屏一级水电站左岸导流洞断面采用城门洞型,毛洞尺寸为 $17.7 \text{ m} \times 21.55 \text{ m}$ (宽 \times 高),衬后尺寸 $15 \times 19 \text{ m}$ (宽 \times 高),洞身长 $1\,214.4 \text{ m}$,进、出口底板高程分别为 $1\,638.50 \text{ m}$ 和 $1\,634.00 \text{ m}$ 。垂直埋深 $300 \text{ m} \sim 350 \text{ m}$,水平埋深 300 m 。围岩岩性为浅灰色薄~中厚层条纹状大理岩、灰绿色薄层绿片岩,岩层产状 $N20^\circ \sim 25^\circ E/NE \angle 45^\circ \sim 50^\circ$ 。在 $0+430 \text{ m} \sim 0+435 \text{ m}$ 处发育一条煌斑岩脉断层,产状 $N50^\circ - 60^\circ E/SE \angle 70^\circ \sim 75^\circ$,宽 $1.2 \text{ m} \sim 1.5 \text{ m}$,三壁贯通,岩体新鲜坚硬,在煌斑岩脉与大理岩接触部位,间有厚 $2 \sim 3 \text{ m}$ 的挤压片岩、糜棱岩,性状较差。洞室围岩工程地质条件较差,围岩结构面

发育、性状差,岩层走向与洞轴线夹角小。裂隙主要发育 3 组:1) 层面裂隙, $N10^\circ \sim 40^\circ E/\angle NW40^\circ \sim 60^\circ$,间距 $20 \sim 60 \text{ cm}$,局部 $5 \sim 15 \text{ cm}$,延伸长,平直粗糙,局部锈染,绿片岩面多平直光滑,面附绿泥石膜;2) $N35^\circ \sim 55^\circ E/SE \angle 50^\circ \sim 60^\circ$,间距 $30 \text{ cm} \sim 100 \text{ cm}$,部分 $20 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$,延伸长度一般 $2 \text{ m} \sim 5 \text{ m}$,个别大于 10 m ,平直粗糙,局部锈染;3) $N60^\circ \sim 65^\circ W/SW \angle 30^\circ \sim 35^\circ$,间距 $40 \text{ cm} \sim 100 \text{ cm}$,延伸一般 $1 \text{ m} \sim 3 \text{ m}$,面起伏粗糙,面锈染。属于高地应力区,最大主应力达 $34.14 \text{ MPa} \sim 40.4 \text{ MPa}$,方向 $N50^\circ - 60^\circ W$,主应力 σ_1 与洞轴线夹角较大,基本与洞壁垂直。典型工程地质剖面见图 1。

锦屏一级水电站左岸导流洞于 2004 年 11 月开挖至 2006 年 11 月底完建,共历时约 25 个月。2005 年 11 月 7 日、11 月 23 日、12 月 15 日, $K0+430 \text{ m} \sim K0+550 \text{ m}$ 段发生 3 次较大规模的塌方,最大塌方高度达 $22 \text{ m} \sim 26 \text{ m}$ (顶拱以上),塌方空腔跨度一般达 $25 \text{ m} \sim 30 \text{ m}$,塌方面积约 $1\,500 \text{ m}^2$,塌方量约 $40\,000 \text{ m}^3$ 。

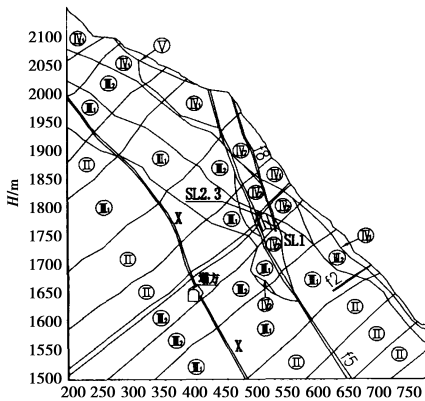


图 1 工程地质剖面图

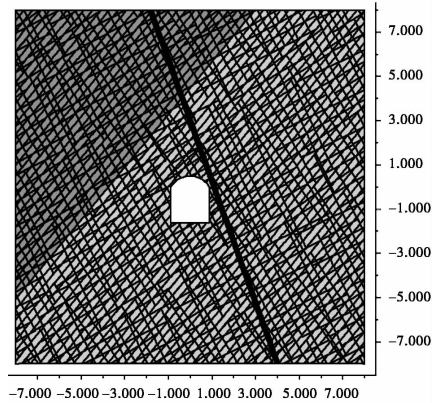


图 2 计算模型

3 地质概化模型和计算参数^[5]

根据地质情况,模拟计算范围以洞室断面拱肩水平线和垂直中心线交点为坐标原点,边界范围为 80 m (宽) \times 80 m (高)。采用统计节理模型,模拟了 3 组主要的结构面:第一组,层面,间距 3 m ,倾角平均值 50° ;第二组节理,间距 4 m ,倾角平均值 -60° ,均方差 5° ;第三组节理,间距 6 m ,倾角平均值 35° ,均方差 5° 。煌斑岩脉断层,倾角 -70° ,水平宽度

2 m 。水平方向地应力 40 MPa ,垂直方向地应力 30 MPa 。

岩体材料采用理想弹塑性模型,屈服准则为 Mohr-Coulomb 强度准则,节理采用弹性模型,屈服准则为 Coulomb 滑动准则,岩体材料及结构面参数见表 1,结构面法向刚度及切向刚度取值参考文献[5-8]。导流洞周边区域单元适当加密,单元总数 $9\,782$ 个,模型底部边界限制垂直位移,两侧边界限制水平位移,模型如图 2。

表 1 岩体材料及结构面参数

材料	II 2 大理岩	III 2 大理岩	煌斑岩脉	层面	节理 1	节理 2
密度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	27.00	25.60	23.50			
体积模量/GPa	13.0	9	5			
剪切模量/GPa	8	6	3			
法向刚度 K_n /($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)			90	90	90	90
切向刚度 K_s /($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)			4	6	5	5
内摩擦角 ψ ($^\circ$)	46.90	45.6	18.0	26.0	20.0	24.0
内聚力/MPa	1.50	0.90	0.05	0.05	0.05	0.05
抗拉强度/MPa	1.0	0.6	0	0	0	0

4 离散元模拟计算结果及分析

采用离散元法对建立的导流洞模型进行计算,计算工况分为无支护全断面开挖。从 $\text{step}=23\ 310$ 步时隧道围岩张开节理分布图(图3)可以看出,隧道围岩张开节理分布基本呈菱形分布,拱顶成“人”字型,拱底成“V”字型。在拱肩、拱脚处分布较密集,分布深度较大。左边墙拱肩张开节理分布深度达到 19.66 m,右边墙拱肩张开节理深度达到 19.56 m,拱顶张开节理深度达到 12.50 m。

从 $\text{step}=23\ 310$ 步时隧道围岩位移分布图(图4)可以看出,右边墙围岩位移最大,最大位移达到 0.557 m,左边墙和

拱顶变形较小。由于水平地应力大于垂直地应力,洞室开挖后,边墙的卸荷左右明显强于拱顶,同时由于直立边墙抵抗变形的能力明显弱于圆弧型拱顶,因此左右边墙的围岩变形较大,加上右边墙存在断层,因此右边墙围岩变形大于左边墙。

不同计算时段的围岩变形破坏及塌落过程如图5所示。在 $\text{step}=53\ 310$ 步时,右边墙、拱顶结构面开始张开、错动,左边墙结构面变化不明显;在 $\text{step}=103\ 310$ 步时,右边墙错落,拱顶明显下沉,左边墙结构面张开;在 $\text{step}=203\ 310$ 步时,右边墙开始垮塌,拱顶出现塌方;在 $\text{step}=403\ 310$ 步时,右边墙、拱顶及左边墙完全塌落,形成“人”字型塌方边界,与实际发生情况一致(图6、7)。

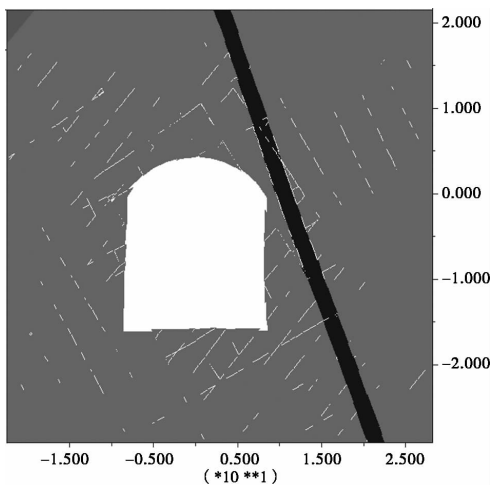


图3 周边张开节理分布图

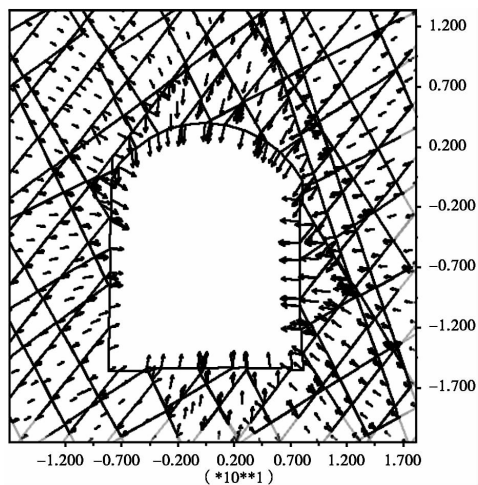


图4 导流洞围岩总位移分布图

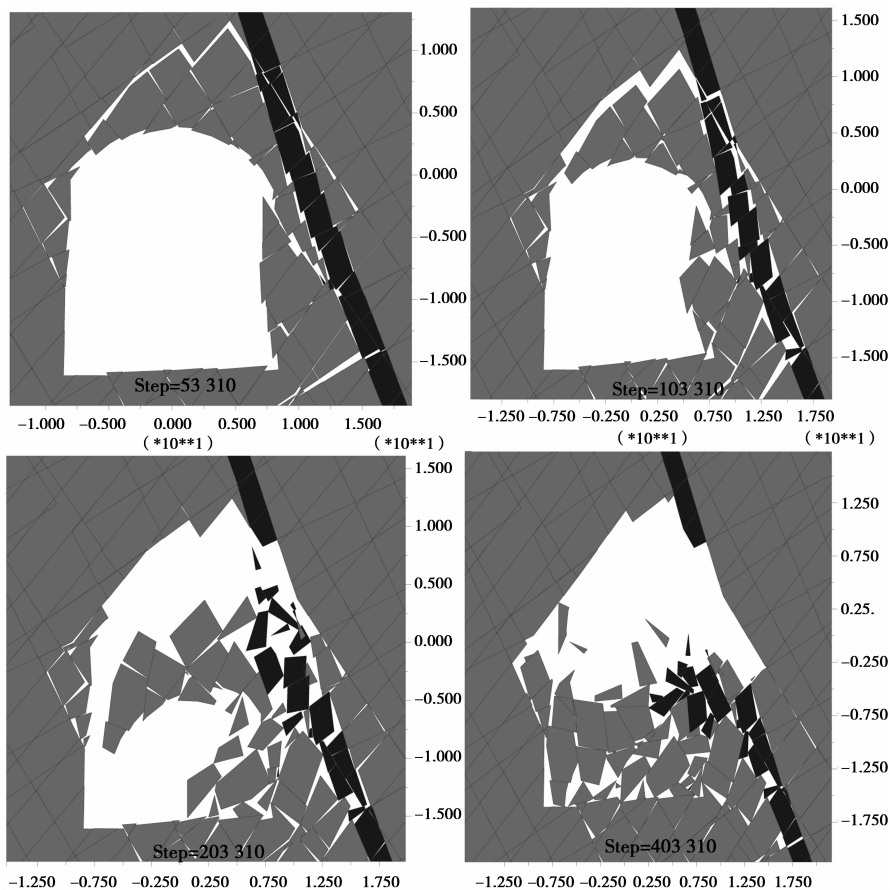


图5 导流洞围岩塌方过程



图6 左岸导流洞顶拱塌方照片

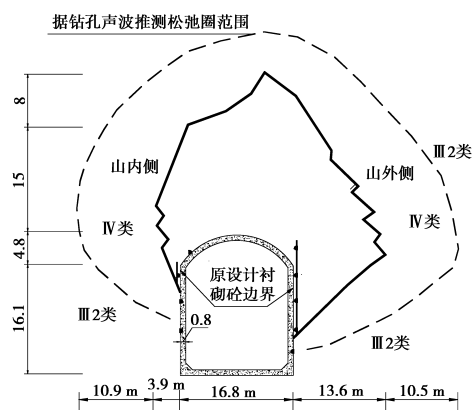


图7 左岸导流洞实测塌方典型断面图

根据以上计算结果和实际塌方情况分析可知,由于地应力较大,开挖后应力释放,直立边墙抵抗变形能力较差,围岩卸荷回弹,节理发生错动及张开,形成纵向裂缝;由于圆弧形拱顶对变形的约束作用,拱顶的变形破坏稍为滞后一些,随着计算时间的增加,边墙破坏加剧,拱顶的约束作用减弱,变形破坏跟进,最后形成大规模的塌方,是高地应力释放和不利的地质结构面联合作用的结果。其变形破坏模式与低应力条件下的变形破坏模式有较大区别。低应力区地下洞室开挖后,围岩的位移以及由位移所引起的变形破坏主要是发生在洞顶垂直方向^[6-7],而高应力区围岩的变形破坏主要是发生洞室边墙,如果边墙变形破坏加剧将导致拱顶坍塌,从而引起较大规模的塌方。

5 结论

通过复杂地质条件下导流洞的离散元法数值计算,模拟导流洞塌方过程,分析洞室围岩变形破坏机理,数值模拟计算结果显示的导流洞塌方过程与实际塌方发生情况基本一

致,表明离散元法可以较好地模拟高地应力、围岩被节理和断层切割等复杂地质条件下洞室围岩变形破坏过程,其计算结果可为洞室开挖方法、围岩支护方式及时机选择提供依据。

参考文献:

- [1] 王泳嘉,邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳:东北工学院出版社,1992.
WANG Yongjia, XING Jibo. Discrete element method and its application in Geomechanics[M]. Shenyang, Northeastern University Press,1992. (in Chinese)
- [2] 魏群. 散体单元法的基本原理数值方法及程序[M],北京,科学出版社,1991.
- [3] 王卫华,李夕兵. 离散元法及其在岩土工程中的应用综述[J]. 岩土工程技术,2005,19(4).
WANG Weihua, LI Xibing. A Review on Fundamentals of Distinct Element Method and Its Application in Geotechnical Engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, Aug, 2005, V01.19 No. (in Chinese)
- [4] 张鹏,叶式穗. 锦屏一级水电站左岸导流洞塌方治理[J]. 水利水电技术,2007,38(6).
ZHANG Peng, YE Shisui. Treatment for collapse in diversion tunnel on left bank of Jinping Hydropower Station I[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, (in Chinese)
- [5] 张恩宝,张建海,周钟,等. 锦屏导流洞局部洞段围岩失稳成因及支护研究[J]. 云南水力发电,2006,22(4):40-44.
ZHANG Enbao, ZHANG Jianhai, ZHOU Zhong. et al. Study of Unstability and Support of Surrounding Rock in Some Sections of the Jinping River Diversion Tunnel[J]. yunnan water power, (in Chinese)
- [6] 王吉亮,陈剑平,苏生瑞,等. 节理岩体隧道塌方机理离散元研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(3):316~319.
WANG Jiliang, CHEN Jianping, SU Shengrui. Study of Collapse Mechanism of Tunnels in Jointed Rock Mass by Distinct Element Method[J]. (in Chinese)
- [7] 胡夏嵩,赵法锁. 低地应力区地下洞室开挖后围岩位移二维离散元数值模拟[J]. 水利水电技术,2004,35(9):37-39.
HU Xiasong, ZHAO Fasuo. 2D Discrete Element Method simulating displacement characteristics of surrounding rockmass of underground excavation in the low ground stress region[J]. Water resources and hydropower engineering(in Chinese),2004,35(9):37-39.
- [8] 廖明,隆威,陈良义,等. 隧洞开挖支护的离散元模拟[J]. 新疆有色金属,2008,95-98.
LIAO Ming, NONG Wei, CHENG Liangyi, et al. The discrete element simulation of Tunnel excavation and support[J]. Xinjiang Nonferrous Metals,2008,95-98, (in Chinese)

(编辑 欧阳雪梅)