

# 错动带对导流隧洞围岩稳定影响的3DEC模拟

刘 强<sup>1,2</sup>, 吴文兵<sup>2</sup>, 洪望兵<sup>3</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**在水利工程导流隧洞施工中,层间错动带是影响导流隧洞围岩稳定性的主要地质构造之一。研究层间错动带对导流隧洞开挖和支护的影响,对评价其围岩稳定具有重要的工程意义。以西南某水电站导流隧洞施工为例,采用离散元3DEC软件模拟了导流隧洞层间错动带洞段的开挖和支护情况,并结合现场监测资料,对层间错动带洞段的应力变化特征进行了分析,论证其支护方案的可行性。模拟结果可供类似的工程参考借鉴。

**关键词:**错动带; 围岩稳定; 3DEC; 导流隧洞

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.006

在西南高山峡谷地区修建水电站常需要修建导流隧洞来导流。由于导流隧洞断面大、埋深大、地质条件复杂,受人工开挖影响较大,因此,对导流隧洞围岩稳定性进行深入分析显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。前人采用不同的方法和手段对导流洞开挖和支护过程中的围岩稳定性进行了分析<sup>[3-6]</sup>。针对层间错动带也有一定的研究:江权等<sup>[7-9]</sup>通过室内试验和现场试验,探讨了层间错动带的强度参数取值,分析了错动带的破坏模式和剪切特性;金长宇等<sup>[10]</sup>采用数值模拟方法分析了错动带对超大型地下洞室群围岩稳定的影响。

目前,单独针对导流隧洞围岩稳定分析和错动带的研究较多,但关于错动带对导流隧洞围岩稳定性的影响研究却很少。基于此,本文采用3DEC软件,模拟层间错动带对导流隧洞开挖和支护的影响,并结合监测结果分析错动带对导流隧洞围岩稳定的影响。

## 1 工程概况与错动带特征

西南某水电站工程施工导流采用围堰断流、隧洞导流方式,导流方案采用5条导流隧洞,左岸布置3条,右岸布置2条。分析地质勘查资料发现,层间错动

带是影响导流隧洞围岩稳定的主要地质构造。该错动带是发育于各岩流层顶部凝灰岩层中的缓倾角、贯穿性的错动构造。在后期地应力的作用下,各岩流层沿凝灰岩产生错动,同时在长期地下水及风化作用下发生蚀变和泥化<sup>[9-11]</sup>,如图1所示。

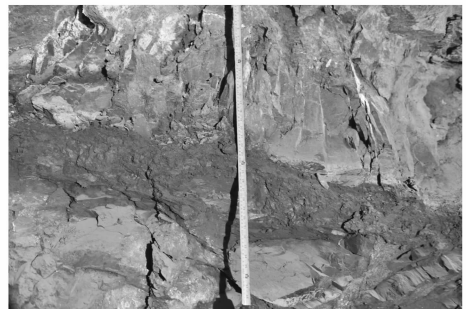


图1 C2层间错动带

错动带岩体的破坏与岩体的应力特征、错动带发育的角度及错动带与接触面的组合形式等密切相关。依据岩体力学的岩体结构控制理论<sup>[11-12]</sup>,可以将错动带岩体的破坏模式分为劈裂拉张破坏、剪断岩体破坏和层间剪切滑移破坏三大类。其中劈裂拉张破坏和剪断岩体破坏属局部破坏,而沿层间错动带发生

收稿日期:2014-06-20;修回日期:2014-10-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51309207);中国博士后科学基金特别资助项目(2013T60759)

作者简介:刘 强,男,硕士研究生,主要从事基础工程方面的研究。E-mail:635621689@qq.com

通讯作者:段隆臣,男,教授,博士生导师,主要从事地质工程专业的教学和科研工作。E-mail:duanlongchen@163.com

的上、下岩层剪切滑移错动破坏属整体破坏,危害性最大。金长宇等<sup>[10]</sup>等根据该工程现场剪切试验曲线,利用回归分析方法对剪切刚度进行了反演,最终获得回归后的剪切刚度为  $K_s = 0.41 \text{ GPa}$ 。

2 计算模型及材料参数

本文以 3 号导流隧洞出露的层间错动带 C2 为例,建立数值计算模型。导流隧洞洞身断面为  $17.5 \text{ m} \times 22.0 \text{ m}$  城门洞形,进口高程为  $585 \text{ m}$ ,出口高程为  $580 \text{ m}$ ,洞长  $1\,584 \text{ m}$ 。层间错动带 C2 总体上平顺,产状  $N40^\circ \sim 50^\circ \text{E}$ ,  $SE \angle 15^\circ \sim 20^\circ$ ,带内泥质条带分布在错动带顶部,厚  $4 \sim 5 \text{ cm}$ ,呈软塑状,且夹有岩屑。沿错动带上接触面有渗滴水。错动带上盘岩体为凝灰岩及隐晶质玄武岩,岩体较破碎,凝灰岩的厚度为  $30 \sim 45 \text{ cm}$ 。下盘岩体为凝灰岩及角砾熔岩,岩体较完整,凝灰岩厚度  $25 \sim 35 \text{ cm}$ ,在导流隧洞出露的桩号为  $K0 + 960 \sim K1 + 080 \text{ m}$ ,此段导流洞轴线与 C2 层间错动带的夹角为  $15^\circ \sim 20^\circ$ 。导流洞轴线与 C2 层间错动带地质素描关系图见图 2。

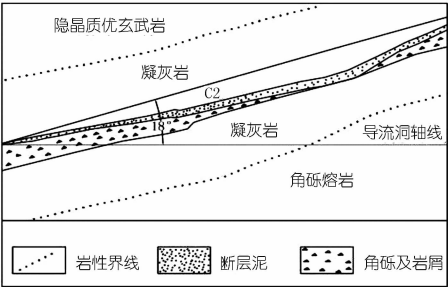


图 2 C2 层间错动带地质示意

由图 2 可以发现,该结构为类似于“夹心饼干”的一种特殊构造。在夹心的上界面为隐晶质玄武岩,夹心的下界面为角砾熔岩,凝灰岩和错动带为其夹心。本文采用离散元 3DEC 软件,仅对错动带附近岩体进行分析计算时,将错动带和凝灰岩一起考虑,根据实验数据和现场地质情况,取错动带厚度  $0.3 \text{ m}$ ,变形模量  $0.04 \text{ GPa}$ 。两侧凝灰岩厚度  $1.2 \text{ m}$ ,变形模量  $2.0 \text{ GPa}$ ,总厚度  $1.5 \text{ m}$ ,计算得其等效综合变形模量为  $0.19 \text{ GPa}$ 。依据已有的岩体力学试验结果,对岩体和层面的力学参数进行了综合评价,选取计算参数参见

表 1。

模型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  $120 \text{ m}$  (长)  $\times 180 \text{ m}$  (宽)  $\times 120 \text{ m}$  (高)。根据围岩发生的变形情况以及围岩的材料特性,上盘的隐晶质玄武岩、中间的夹层及下盘的角砾熔岩采用理想弹塑性模型,屈服准则为 Mohr - Coulomb 准则;层面采用弹性模型,采用库伦滑动准则。模型底部边界限制垂直位移,四周边界限制水平位移。计算模型如图 3 所示。

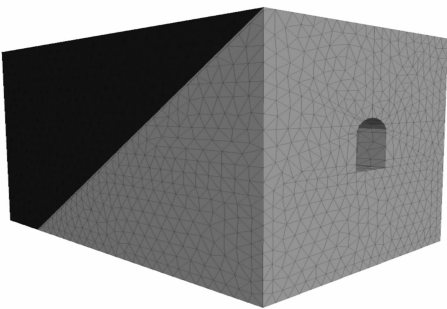


图 3 计算模型

根据工程区现有地应力实测资料和研究成果,此段导流隧洞埋深为  $320 \text{ m}$  左右,围岩竖直应力为  $8.4 \text{ MPa}$ ,最大水平主应力为  $13.8 \text{ MPa}$ ,最小水平主应力为  $11.3 \text{ MPa}$ ,水平主应力方向为  $S27^\circ \text{E}$ 。此段导流隧洞的轴线方向为 NS 向,综合考虑计算后,加载到模型水平  $X$  轴方向应力为  $11.9 \text{ MPa}$ ,  $Y$  轴方向的应力为  $13.2 \text{ MPa}$ ,  $Z$  轴方向的应力为  $8.4 \text{ MPa}$ 。计算时考虑了初始自重应力场对模型的影响。

3 开挖支护模拟及监测方案

3.1 开挖支护模拟

对导流隧洞的开挖和支护按施工情况进行数值模拟。其开挖方法如下:洞身自上而下分 3 层进行开挖支护,考虑到开挖机械性能及支护施工的需要,Ⅰ层开挖时先开挖中导洞,再向两边扩挖,确定开挖高度为  $6 \sim 8 \text{ m}$ ;Ⅱ层开挖高度为  $12 \sim 14 \text{ m}$ ;Ⅲ层主要为保护层开挖,开挖高度为  $2 \sim 4 \text{ m}$ 。上层开挖支护完成后才对下一层进行开挖。

错动带属于软弱结构面,强度较低,地质勘查发

表 1 岩体力学参数<sup>[11-12]</sup>

岩性	密度 $\rho /$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	体积模量 $K / \text{GPa}$	剪切模量 $G / \text{GPa}$	内摩擦角 $\Phi / (^\circ)$	抗拉强度 $\sigma_t / \text{MPa}$	凝聚力 $c / \text{MPa}$	法向刚度 $K_n /$ ( $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	剪切刚度 $K_s /$ ( $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )
隐晶质玄武岩	2.87	32.00	21.00	63	6.0	11.00		
夹层	2.20	0.16	0.07	20	0	0.09		
角砾熔岩	2.66	20.00	12.00	53	4.5	13.00		
层面				26	0	0.05	0.5	0.41

现,结构面发生原生的滑动,导致错动带对导流隧洞围岩稳定产生较大影响。根据以前所做的分析发现,错动带对顶拱的影响最为严重,因此,必须对错动带顶拱进行特殊处理。为降低表层错动带对导流隧洞顶拱围岩稳定的影响,采取喷 28 cm 厚 C25 素混凝土、挂钢筋网、立钢拱架等处理措施;为抑制顶拱深部错动带的滑动和张开,设置了长 9 m 的预应力锚杆和长 6 m 的砂浆锚杆对错动带进行锚固。其他部位按Ⅲ类围岩进行支护。具体支护方式和支护参数见表 2。

表 2 加强支护措施

部位	支护方式	支护参数
顶拱	喷混凝土	初喷 6cm 厚 C25 素混凝土
		复喷 22cm 厚 C25 素混凝土
	锚杆支护	9m 长 Φ32 预应力锚杆, $T=150\text{kN}$
		6m 长 Φ28 砂浆锚杆@120cm×120cm
	挂网	挂钢筋网 Φ6.5 @15cm×15cm
边墙	钢拱架	I22b 钢拱架支护@120cm
	喷混凝土	喷 10cm 厚 C25 素混凝土
	锚杆支护	6m 长 Φ28 砂浆锚杆@150cm×150cm
		4.5m 长 Φ25 砂浆锚杆@150cm×150cm
	挂网	随机挂网

计算过程中置换的混凝土采用弹性模型,其弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.16。锚杆采用 3DEC 中的 CABLE 单元,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.15,并施加相应的预应力。图 4 为错动带和喷锚支护模型。

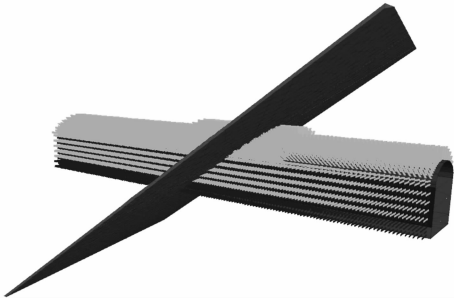


图 4 支护模型

3.2 监测方案

导流隧洞开挖过程中,针对层间错动带,采用三点变位计和锚杆应力计来监测错动带在导流隧洞拱顶出露部位的围岩变形与应力变化情况。三点变位计和锚杆应力计都安装在导流隧洞桩号为 K1+080 m 附近,三点变位计布置在层间错动带出露断面顶拱和右边墙中部,3 个点分别距孔口 0.2 m 和 9 m 处,锚杆应力计分别布置在顶拱和左右边墙附近,布置位置如图 5 所

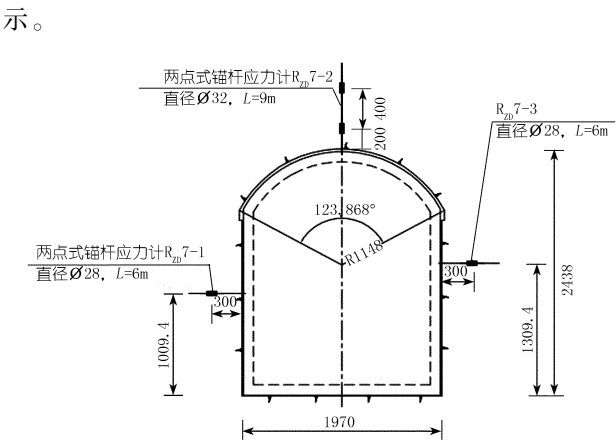


图 5 锚杆应力计监测断面布置(单位:cm)

4 结果分析

4.1 变形特征

图 6 为支护前后导流隧洞围岩位移云图。从未支护的模拟图中可以看出:层间错动带在顶拱出露处,顶拱下沉量最大,错动带为缓倾角时,对顶拱位移的影响范围较大;层间错动带在左拱肩出露处,局部岩体受到向内挤压变形,产生应力集中现象,揭示了左拱肩掉块明显的原因;错动带在底板出露处,底板垂直向上鼓起,位移较大,故在施工中对此处错动带深挖 50 cm 并用混凝土置换。

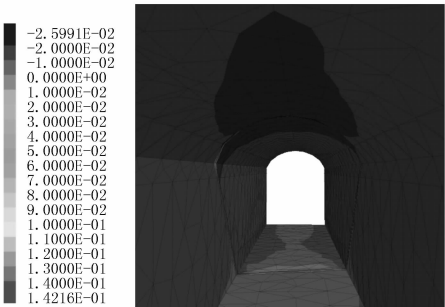


图 6 未支护位移云图

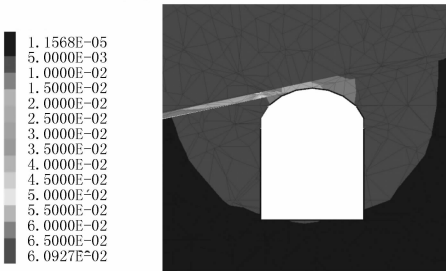


图 7 支护后监测断面位移云图

图 7 为支护后错动带在拱顶出露断面(也是监测断面处)的位移云图。发现支护后位移明显减少,仅拱顶和左拱肩部位位移在 10 mm 以上。结合现场监

测,在顶拱孔口实测位移为 29.7 mm,跟模拟结果比较接近,但在距孔口 2,9 m 处的监测值比数值计算值明显偏小,结合多点位移计在其他错动带出露部位的监测结果和类似工程经验,分析原因主要与位移监测的滞后性和多点位移计对于软岩的适用性相对较差有关。

4.2 应力特征

图 8 为现场锚杆应力监测数据图。锚杆应力计测值主要表现出以下规律:顶拱锚杆应力计  $R_{zd}7-2A$  离洞口较近,在洞室爆破时,岩体受到的影响较大,相应部位爆破开挖期间,锚杆应力计测值波动也较大;左边墙锚杆应力读数略小于右边墙锚杆应力读数,但应力量级整体不大;锚杆应力变化主要受洞室爆破影响,浅层岩体内部松动,锚杆应力增大,洞室开挖远离监测部位后,爆破影响减小,锚杆应力趋于稳定。

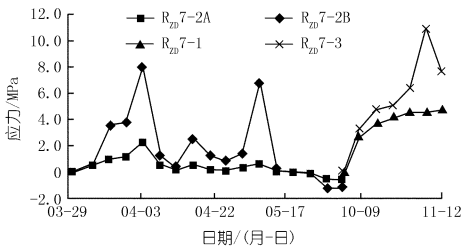


图 8 锚杆应力监测值

图 9 为支护后监测部位应力随分层开挖时步的变化过程。可以看出顶拱深部围岩应力略小于浅部围岩应力,且随下层开挖,变形较小;左边墙的应力变化值明显大于右边墙应力变化值,随下部岩体开挖,变化较大。但整体应力量值较小,稳定后都在 10 MPa 以内,说明支护效果较好。各部位的应力变化值与锚杆应力监测值的变化有很好的 consistency。

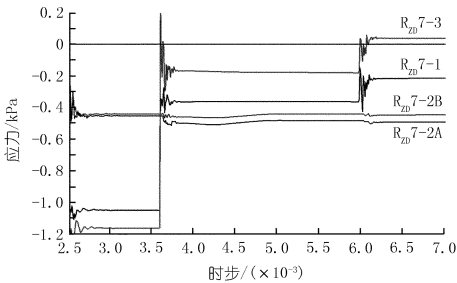


图 9 应力模拟值

4.3 塑性区破坏特征

图 10 为监测断面支护前后塑性区特征。由图可以看出,未支护时层间错动带在起拱线以上部位发生过较大范围的张拉剪切破坏,尤其是在拱顶和左拱肩部位,塑性区明显。支护后导流隧洞整体处于弹性状

态,对比未支护时塑性区有所减少,可见支护方案比较合理。



图 10 塑性云图

5 结论

本文在前人对错动带研究的基础上,通过 3DEC 软件模拟分析层间错动带对导流隧道围岩稳定的影响,结合监测资料得到以下结论:受错动带和地应力的影响,左边墙的应力变化值明显大于右边墙,左拱肩层间错动带出露处局部垂直向上位移最大,产生明显掉块,故在该部位设置监测设备。比较支护后监测部位的位移值,发现实测值读数偏小,分析原因主要与位移监测的滞后性和三点变位计对软岩适用性较差有关。对比监测部位的应力值,实测值和计算值有很好的 consistency,且应力量值较小。支护后塑性区明显减少,表明支护方案比较合理。

参考文献:

[1] 杨开林,吴芝辉.导流隧洞体型系统规划数学模型[J]. 土木工程学报,1994,27(4):13-21.  
[2] 朱维申,何满潮.复杂条件下围岩稳定性与岩石动态施工力学[M]. 北京:科学出版社,1996.  
[3] 王海军,张社荣,练继建.大型水电站导流洞围岩稳定分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(7):869-873.  
[4] 陈守煜,胡吉敏,李敏.水电站导流洞围岩稳定性的可变模糊评价方法[J]. 北京工业大学学报,2009,35(4):464-469.  
[5] 刘波,伍鹤皋,苏凯,等.导流隧洞钢拱架与锚喷支护体系有限元分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2009,42(1):29-32.  
[6] 崔芳,高永涛,吴顺川.断层影响下隧道锚喷支护效果的数值模拟[J]. 金属矿山,2011,42(6).  
[7] 江权,冯夏庭,周辉,等.层间错动带的强度参数取值探讨[J]. 岩土力学,2011,32(11):3379-3386.

[8] 徐鼎平,冯夏庭,崔玉军,等.含层间错动带岩体的破坏模式及其剪切特性研究方法探讨[J].岩土力学,2012,33(1):129-136.

[9] 徐鼎平,冯夏庭,崔玉军,等.白鹤滩水电站层间错动带的剪切特性[J].岩石力学与工程学报,2012,(1):1692-2703.

[10] 金长宇,张春生,冯夏庭.错动带对超大型地下洞室群围岩稳定影响研究[J].岩土力学.2010,31(4):1283-1288.

[11] 唐鸣发.金沙江白鹤滩水电站可行性研究坝区岩体力学及参数取值研究报告[R].杭州:中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,2008.

[12] 刘佑荣,唐辉明.岩石力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.

(编辑:赵凤超)

## Simulation of influence of disturbed belt on surrounding rock stability of diversion tunnel by using 3DEC software

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, WU Wenbing<sup>2</sup>, HONG Wangbing<sup>3</sup>, DUAN Longchen<sup>2</sup>

(1. Rock – soil Drilling and Protection Engineering Research Center of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The interlayer disturbed belt is one of the main influential factors to the stability of surrounding rock of diversion tunnel in hydropower station. The research on the influence of the interlayer disturbed belt on the diversion tunnel excavation and supporting has an important engineering significance to the evaluation of surrounding rock stability. Taking the construction of diversion tunnel of a hydropower station in southwest China as an example, the diversion tunnel excavation and support of the section with interlayer disturbed belt is simulated by the discrete element 3DEC software. Combining with the field monitoring data, the feasibility of its supporting method is verified, which can provide reference for similar engineering cases.

**Key words:** disturbed belt; stability of surrounding rock; 3DEC; diversion tunnel

(上接第 29 页)

## Application of safety monitoring technology in expansive soil canal

XIE Xiangrong, CHENG Xiang, LI Shuangping

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The special characteristics of expansive soil bring harm to the engineering structures built on it, especially to the canal structures. So the safety monitoring of expansive soil canal is crucial. Combining with the safety monitoring of trial section of the expansive soil canal of Middle Route Project of South to North Water Diversion, which is a key part of the 12th Five – Year Plan of Science and Technology Development Program, the application of safety monitoring technologies in the expansive soil canal safety monitoring is summarized and the application prospects are analyzed. It provides fundamental information for the study of expansive soil canal deformation and failure mechanism and treatment design.

**Key words:** safety monitoring; automation; visualization; internet of things; expansive soil channel

