

# 不良地质引水隧洞开挖支护应力变形数值模拟研究

洪振国, 李建伟

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

**摘要:** 选取围岩强度低、变形量大的不良地质段为代表断面进行计算分析,建立了 FLAC3D 模型,研究隧洞开挖支护围岩的变应力变形情况。结果表明:隧洞的开挖破坏了围岩的原始应力场,隧洞径向轴力释放,切向应力集中,隧洞顶拱位置形成了比较明显的开挖松动圈。隧洞支护后,支护措施承受部分围岩压力,围岩应力得到改善,隧洞围岩变形明显减小,开挖断面变形整体趋于均匀,隧洞周边塑性区有所改善,因此支护措施对围岩变形起明显的限制作用。

**关键词:** 不良地质; 引水隧洞; 隧洞开挖; 开挖支护; 围岩应力; 变形; 数值模拟

**中图分类号:** TV554; U455.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2017)04-0205-05

## Numerical simulation research on the unfavorable geological diversion tunnel excavation support stress deformation

HONG Zhenguo, LI Jianwei

(Yunnan Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

**Abstract:** The unfavorable geological section with low strength and large deformation of the surrounding rock was selected as the representative section for the calculation and analysis, and the FLAC3D model was used to study the deformation and stress of surrounding rock of tunnel excavation support. The results show that tunnel excavation destroy the original stress field of surrounding rock, the radial axial force of the tunnel releases, tangential stress concentrates, and the tunnel top arch position forms an obvious excavation loop. After the tunnel supporting measures, the supporting measures bear some of the surrounding rock pressure, the surrounding rock stress is improved, the tunnel surrounding rock deformation is obviously reduced, the overall deformation of excavation section tends to be uniform, and the plastic zone around the tunnel has been improved. Therefore, the supporting measures have restrict effect on the deformation of surrounding rock.

**Key words:** unfavorable geological; diversion tunnel; tunnel excavation; excavation support; surrounding rock stress; surrounding rock deformation; numerical simulation

引水隧洞作为一种重要的地下工程建筑物,隧洞开挖支护措施合理性直接关系到隧洞施工的安全<sup>[1-4]</sup>。目前随着我国水利水电工程的发展,地下工程尤其是大型长距离引水隧洞常遇到不良地质,不良地质结构松散、破碎、结构面发育、强度低,开挖后应力重新分布,岩体自稳能力差,变形量大,在施工过程中经常出现围岩失稳、塌方造成人员伤亡和设备损失,不仅延误工期、增加造价,还造成生命财产的损失。因此,有必要对不良的地质引水隧洞开挖支护应力变形进行深入的数值模拟研究,提前分

析预知围岩的应力变形情况<sup>[5-7]</sup>,从而采取相应工程措施对工程建设具有十分重要的意义。本文采用 FLAC3D 模型对云南某引水工程引水隧洞开挖支护的过程进行应力变形数值模拟,分析隧洞支护措施的合理性。

## 1 工程概况

云南某引水工程是云南省可持续发展的战略性基础工程,具有显著的经济效益、社会效益和生态效益。渠首位于石鼓,经过丽江、大理、楚雄、昆明、玉

溪、红河蒙自<sup>[8-12]</sup>,渠首流量  $135 \text{ m}^3/\text{s}$ 。引水线路总长 661km。输水工程等别为一等工程,主要建筑物级别为 1 级,采用无压引水方式<sup>[13-16]</sup>。引水隧洞大约占线路总长的 90%,不良地质引水隧洞的马蹄型断面在应力、围岩位移上均优于城门洞型断面,因此隧洞洞型选用马蹄型。引水隧洞底坡  $i = 1/4000$ ,净高  $H = 9.1 \text{ m}$ ,净宽  $B = 9.1 \text{ m}$ ,顶拱内半径为  $R_1 = 4.55 \text{ m}$ ,侧拱及底拱内半径为  $R_2 = 9.1 \text{ m}$ ,隧洞围岩岩性以灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主,有少量凝灰岩、火山角砾岩分布,无侵入岩体。引水隧洞主要工程地质问题是不良地质开挖引起围岩失稳问题。

## 2 开挖支护方式

隧洞施工程序包括隧洞开挖、支护和混凝土衬砌施工,隧洞开挖主要采用钻爆“核心土”法进行施工,按照“先边后中、先软后硬”、“短进尺、小药量、控爆破”的原则先挖除周边岩体<sup>[17]</sup>。支护措施采用初喷混凝土→系统锚杆支护→挂网钢筋→钢支撑安装→喷混凝土的程序。引水隧洞支护措施设计:挂网喷 20 cm 混凝土、网格  $\Phi 6.5@200 \times 200 \text{ mm}$ ,系统锚杆  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $\Phi 25$ ,  $L = 6.0 \text{ m}$ ,钢支撑 I 20 型@  $50 \sim 80 \text{ cm}$ ,纵向  $\Phi 25$  钢筋@  $100 \text{ cm}$ ,超前锚杆 L450 $\Phi 25@20 \text{ cm}$ ,超前小导管  $L = 4.5 \text{ m}$ , $\Phi 42@30 \text{ cm}$ (软岩、断层、破碎带)。

## 3 应力变形数值计算

应力变形数值计算分析主要采用 FLAC3D 型数模,FLAC3D 型数模的求解采用散模型方法、有限差分方法和动态松弛方法 3 种计算方法。离散模型方法就是连续介质被离散为若干互相连接的六面体单元,作用力均被集中在节点上。有限差分方法是变量关于空间和时间的一阶导数均用有限差分来近似表达。动态松弛方法是应用质点运动方程求解,通过阻尼使系统运动衰减至平衡状态。

为了较好地模拟围岩在开挖支护围岩应力变形分布情况,将隧洞剖面进行网格离散。在形成网格的过程中,首先根据深埋隧洞岩体分区、断层分布位置将隧洞剖面划分为若干个区域,然后根据各个部位计算精度的要求控制网格划分的疏密,最终形成计算所需要的整体网格,见图 1。

根据隧洞地质情况,不良地质隧洞代表断面围岩岩性以灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主,该处隧洞埋深大、围岩强度低、变形量大,不论从围

岩岩性本身还是工程角度来看,该段地质均为典型的不良地质段。整个计算模型范围为以该截面为中心前后长度各取 5m,围岩范围尺寸以隧洞净宽尺寸的 5 倍取整进行三维建模。隧洞长度方向为 Z 轴,竖向为 Y 轴,垂直隧洞走向为 X 轴,围岩及支护采用八节点六面体单元进行模拟<sup>[18]</sup>,隧洞各部位力学参数见表 1。

表 1 隧洞各部位力学参数

材料	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	摩擦 系数	黏聚力/ MPa	变形模 量/GPa	泊松比
泥岩、页岩	2.1	0.4	0.08	0.3	0.32
砂岩、粉砂岩	2.2	0.5	0.1	1.0	0.34
石英砂岩	2.5	0.6	1.0	6	0.26
灰岩、白云岩	2.6	0.7	1.2	7	0.28
凝灰岩	2.3	0.4	0.1	0.3	0.34
C25	2.5			28	0.167
C30	2.5			30	0.167

## 4 计算结果及分析

### 4.1 隧洞开挖完成后围岩应力分布及变化规律

地下工程是修建在具有一定应力履历的岩体中,在隧洞开挖之前围岩的初始应力主要是由岩体的自重和地质构造引起的,而隧洞开挖后改变了岩体的初始应力状态,使岩体中的应力状态重新分布,引起岩体变形甚至破坏。计算了隧洞开挖后不良地质代表断面的应力分布,计算结果见隧洞开挖完成后围岩的第一主应力分布图 2 和第三主应力分布图 3。

由图 2、3 可知:隧洞的开挖破坏了围岩的原始应力场,呈现隧洞径向轴力释放,切向应力集中的特点,与经典岩石力学理论相关结论相符。洞段开挖完成后,由于应力重分布的影响,压应力主要集中在顶拱或底板部位,围岩第一主应力范围  $-0.31 \sim -21.3 \text{ MPa}$ ,为压应力,最大压应力为  $21.3 \text{ MPa}$ ;围岩第三主应力范围为  $-0.11 \sim -10.0 \text{ MPa}$ ,为压应力,最大压应力为  $10.0 \text{ MPa}$ 。应力超过围岩破坏强度,隧洞开挖之后应力可能会导致围岩发生破坏。

### 4.2 隧洞开挖完成后围岩位移分布及变化规律

隧洞的开挖破坏了岩体的初始应力状态,在洞体四周产生了很高的应力集中现象。此时,只存在切向应力和指向隧道中心的径向不平衡力,切向应力由承载拱承担,而对于径向应力,开挖完成后隧洞是无法承担的,所以会产生应力释放(在有支护的

情况下一部分被初期支护承担),这就是造成洞体开挖后围岩向隧道中心发生位移的原因。

本文计算了隧洞开挖后不良地质代表断面的位移,计算结果见隧洞开挖完成后围岩 X 方向变形图 4 和 Y 方向变形图 5。

由图 4、5 可知:隧洞开挖后,围岩在应力重分布的影响下向临空面变形,距离隧洞距离越远,围岩的位移量越小。隧洞围岩主要以向洞内的变形为主,边墙的变形较大,顶拱表现为向下沉降变形、底板表现为向上的反弹变形,即洞型断面左、右边墙主要表现为 X(水平)方向位移,而顶拱和底板主要表现为 Y(竖直)方向位移。

洞段开挖完成后支护前围岩 X 水平向位移:左边墙最大位移值 154.33 mm,方向向右,在边墙中部;右边墙最大位移值 148.36 mm,方向向左,位置比左边墙靠下;洞段开挖完成后围岩 Y 竖直向位

移:底板最大位移值 175.0 mm,方向向上,在底板中部稍偏左;顶拱最大位移值 150.0 mm,方向向下,在顶拱中间稍偏左。不良地质围岩向洞内变形,可能发生岩体错动。

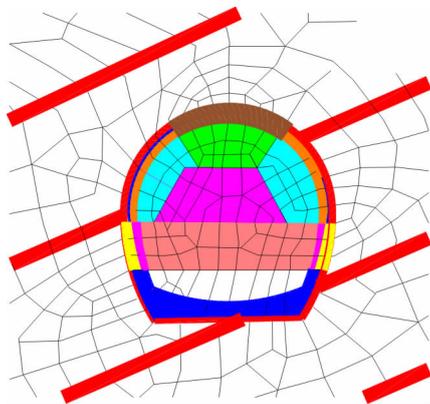


图 1 断面数值模拟网格

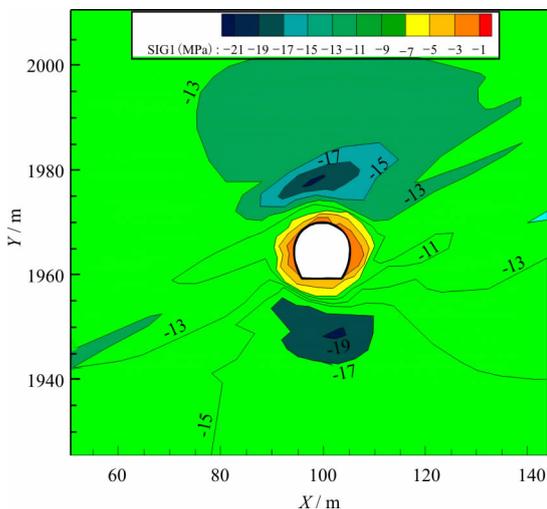


图 2 开挖完成后围岩第一主应力分布

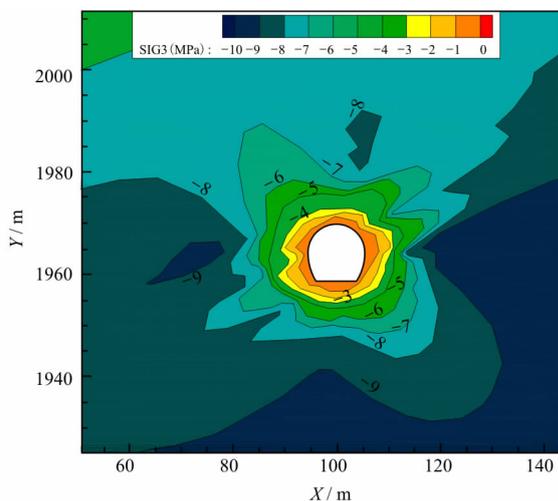


图 3 开挖完成后围岩第三主应力分布

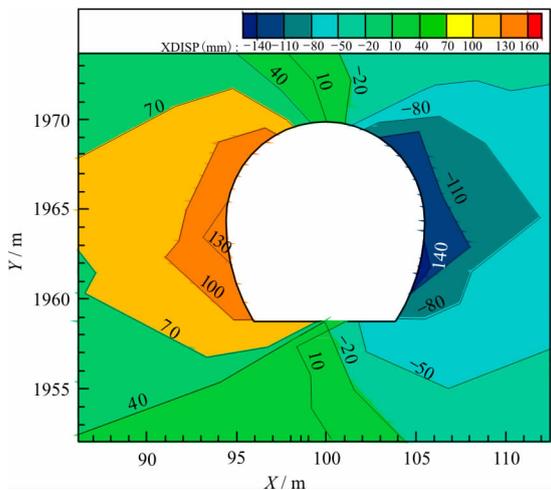


图 4 开挖完成后 X 方向变形

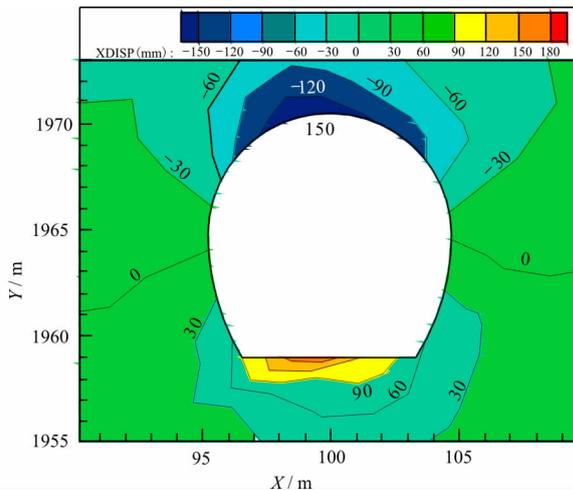


图 5 开挖完成后 Y 方向变形

### 4.3 隧洞支护后围岩应力分布及变化规律

隧洞支护措施承受了部分围岩压力，围岩应力得到改善，围岩变形明显减小，保证隧洞从开挖到钢筋混凝土衬砌期间的围岩稳定性，防止围岩发生有害变形而影响隧洞的施工安全，因而支护措施是隧洞设计施工中的一个重要部分。

隧洞支护后，通过不良地质代表断面的应力计算，围岩的第一主应力、第三主应力分布计算结果见图6、7。由图6、7中可知：洞段开挖支护后围岩第

一主应力范围为  $-0.33 \sim -23.29$  MPa，为压应力，最大压应力为  $23.29$  MPa，围岩第三主应力范围为  $0.33 \sim -10.98$  MPa，部分为压应力，部分为拉应力，最大压应力为  $10.98$  MPa，最大拉应力为  $10.98$  MPa。因此支护措施限制了围岩变形的发展，在支护范围内围岩的应力水平出现了一定的集中现象。

### 4.4 支护后围岩位移分布及变化规律

隧洞支护后，通过不良地质代表断面的位移计算，计算结果见图8、9。

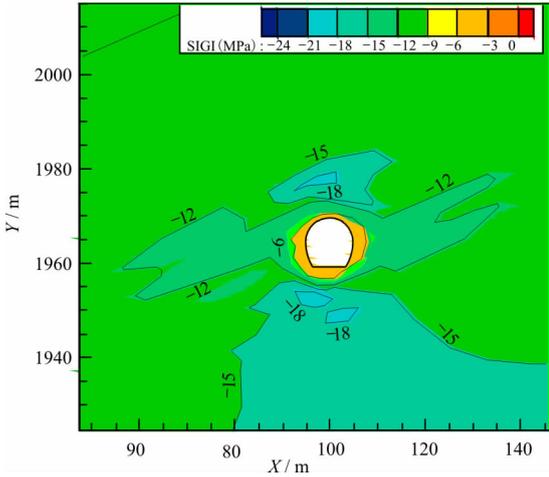


图6 支护后围岩第一主应力分布图

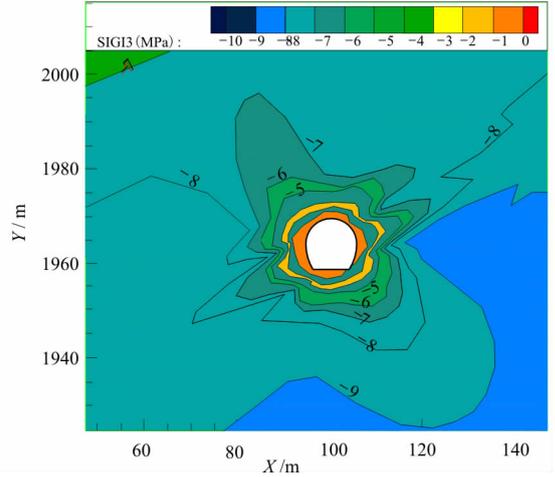


图7 支护后围岩第三主应力分布图

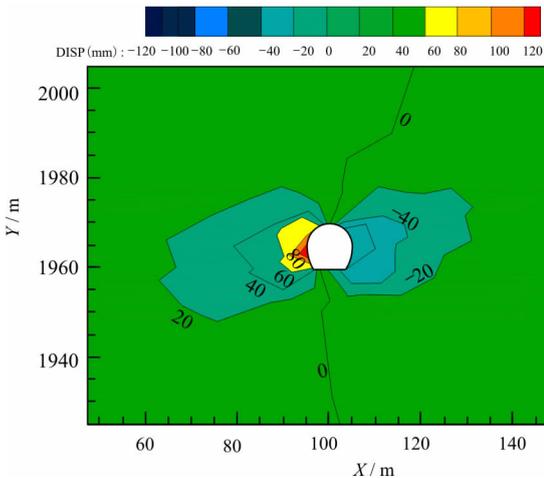


图8 支护后围岩 X 方向变形

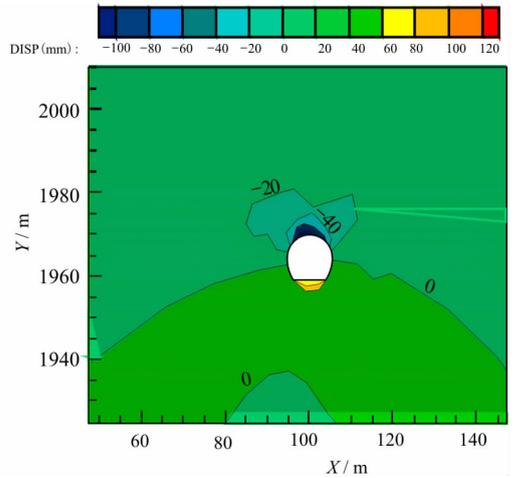


图9 支护后围岩 Y 方向变形

由图8、9可知，隧洞支护后围岩 X 水平向位移：左边墙最大位移值  $119.32$  mm，方向向右，在边墙中部；右边墙最大位移值  $111.41$  mm，方向向左，比左边墙位置靠下；洞段开挖支护完成后围岩 Y 竖直向位移：左底板最大位移值  $125.66$  mm，方向向上，在底板中部稍偏左；顶拱最大位移值  $102.67$  mm，方向向下，在顶拱中间稍偏左。因此支护措施对围岩变形起明显的限制作用。

### 4.5 支护前后围岩应力变形情况

通过上述开挖后和支护后计算结果得到支护前后围岩应力变形成果表2，计算应力以压应力为负，拉应力为正，位移 X 水平向以向右为正，向左为负；Y 竖直向以向下为正，向上为负。

由表2可知：(1)隧洞开挖后，剖面竖直向下最大位移为  $150$  mm，隧洞顶拱位置形成比较明显的开挖松动圈，可能产生围岩失稳、塌方现象，影响隧

洞的施工安全。(2)隧洞支护后,支护措施承受部分围岩压力,围岩应力得到改善,隧洞围岩变形明显减小,开挖断面变形整体趋于均匀,隧洞周边塑

性区有所改善,对围岩变形起明显的限制作用,隧洞围岩是稳定、安全的。

表2 支护前后围岩应力、变形计算成果表

支护	围岩 X 水平向位移/mm		围岩 Y 竖直向位移/mm		围岩第一主应力 范围/MPa	围岩第三主应力 范围/MPa
	左边墙	右边墙	底板	顶拱		
支护前	154.33	-148.36	-175.00	150.00	-0.31 ~ -21.30	-0.11 ~ -10.00
支护后	119.32	-111.41	-125.66	102.67	-0.33 ~ -23.29	0.33 ~ -10.98

## 5 结论

(1)隧洞的开挖破坏了围岩的原始应力场,隧洞径向轴力释放,切向应力集中,隧洞顶拱位置形成了比较明显的开挖松动圈,可能会影响隧洞施工安全,因此开挖后应及时进行支护,防止不良地质岩块体发生失稳。

(2)支护措施承受部分围岩压力,围岩应力得到改善,隧洞围岩变形明显减小,开挖断面变形整体趋于均匀,隧洞周边塑性区有所改善,对围岩变形起明显的限制作用,保证隧洞的施工安全。今后应加强对不良地质的引水隧洞开挖支护应力变形进行数值模拟研究,提前分析围岩应力变形情况,采取相应工程措施,避免在施工过程中围岩失稳、塌方造成人员伤亡和设备损失,因此隧洞开挖支护应力变形数值模拟在工程建设中具有重要的应用价值。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 5195-2004 水工隧洞设计规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2004.

[2] 水电水利规划设计总院. 水工设计手册(水电站建筑物)[M]. 北京:中国水利电力出版社, 2013.

[3] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 5099-2011 水工建筑物地下工程开挖施工技术规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2011.

[4] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 5057-2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国电力出版社, 1996.

[5] 胡宗云,李书,姬俊虎. 西藏旁多水利枢纽灌溉输水洞遥

感工程地质研究[J]. 人民长江, 2011, 42(22): 42-44.

[6] 李瑞,杨晓飞,钟明明. 大伙房水库输水应急入连工程——隧洞施工超前地质预报设计[J]. 东北水利水电, 2012, 30(1): 16-17.

[7] 吕西志. 复杂条件下隧道施工中的超前地质预报方法研究[J]. 四川建材, 2013(6): 162-163+166.

[8] 洪振国,刘浩林,黄立群. 水电站混合式调压井设计研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(12): 111-114.

[9] 洪振国. 水电站调压井形式比选研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(4): 113-117.

[10] 洪振国. 六郎洞电站溢流式调压井型式比选研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(2): 129-133.

[11] 洪振国,黄立群. 调压井结构内力计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 177-182.

[12] 洪振国,王鹏. 露天上室式调压井在引水式电站中的设计研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(3): 194-198.

[13] 洪振国,刘浩林. 水电站阻抗式受力复杂调压井设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6): 148-153.

[14] 洪振国. 云南省某引水工程穿山隧洞间大流量倒虹吸方案选择[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 119-123.

[15] 洪振国,刘浩林. 水电站调压井特征线法水力学计算研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(4): 163-166.

[16] 洪振国,刘浩林. 阻抗式调压井水力学计算研究[J]. 水力发电, 2014, 40(12): 51-54.

[17] 刘德涛,张顶锋. 富水粉细砂层小断面隧洞暗挖施工工艺研究[J]. 山西建筑, 2011, 37(12): 188-190.

[18] 洪振国,李建伟. 高混凝土面板堆石坝应力变形数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 174-178.