大断面蚀变岩圆形引水隧洞施工期稳定性研究

陈　涛[1]，袁超义[1]，薛瑞华[2]，佟　强[2]，何本国[2]

(1. 四川华能泸定水电有限公司，四川 泸定　626100；2. 东北大学，辽宁 沈阳　110819)

摘　要：四川甘孜硬梁包水电站引水隧洞开挖断面半径最大达 7.82 m，采用超前小导管预支护下的多台阶分层开挖方法。采用 FLAC3D 数值分析软件对过沟浅埋段隧洞开挖变形进行了数值研究，研究结果表明在过沟浅埋段针对Ⅳ类围岩采用台阶法开挖，能很好的控制隧洞变形，并且能满足支护结构的安全性要求。分层开挖对隧洞变形有影响，在上层开挖时，主要影响拱顶沉降变形，在开挖中层时，拱顶沉降较小，隧洞变形主要存在于水平向，在后期进行中层开挖时，应注意水平收敛变形的监测，并保证中层锁脚锚杆的施工质量。

关键词：大断面；隧洞；施工；数值模拟；稳定性

中图分类号：P614　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1001-2184(2023)01-0093-04

Study on Stability of Large Section Circular Headrace Tunnel of Altered Rock Mass during Construction

CHEN Tao[1], YUAN Chaoyi[1], XUE Ruihua[2], TONG Qiang[2], HE Benguo[2]

(1. Sichuan Huaneng Luding Hydropower Co., Ltd., Luding Sichuan 626100;
2. Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819)

Abstract: The headrace tunnel of Yingliangbao Hydropower Project in Ganzi Prefecture of Sichuan has a maximum excavation radius of 7.82 m, and the multi-step layered excavation method under the advanced small pipe pre-support is adopted. FLAC3D numerical analysis software is used to carry out numerical research on the excavation deformation of the tunnel in the shallow-buried section. It is shown that the deformation of the tunnel can be well controlled and meet the safety requirements of the support structure using step excavation method. The influence of layered excavation on the tunnel deformation mainly affects the downward deformation of the arch roof in the upper excavation. In the middle excavation, the deformation of the arch roof is small, and the tunnel deformation mainly exists in horizontal direction. In the later middle excavation, attention should be paid to the monitoring data of the horizontal convergence deformation, and the construction quality of the middle foot locking rock bolt should be ensured.

Key words: Large section; Tunnel; Construction; Numerical simulation; Stability

0　引　言

在软岩大断面浅埋隧洞施工过程中不可避免地会对周围环境产生影响，扰动周围地层，引起周围地层的变形及沉降，由于隧道开挖跨度大，其自身结构在施工过程中的安全性也至关重要。为了减轻开挖后对围岩的扰动，往往采取分台阶的施工方法结合尽早进行初期支护限制隧洞变形的方式。吴庆良等[1]运用基于复变函数方法，考虑开挖卸荷和围岩－衬砌相互作用影响，推导了非均匀应力场下开挖后立即支护时衬砌与围岩光滑接触条件下应力与位移的解析解。张晓莉等[2]基于平面弹性复变函数方法，推导出任意孔形水工隧洞的应力解析解。刘闵龙等[3]通过 LSDYNA 软件将建立的各向异性动态损伤本构用于隧道爆破的损伤数值模拟，研究炮孔周围的损伤范围。

目前，针对大断面隧道的施工工法的适用性研究很多，但同时对蚀变岩大断面圆形隧洞研究较少。以甘孜州某引水隧洞工程为背景，采用 FLAC3D 软件分析了蚀变岩大断面圆形隧洞施工期间的变形规律，为类似地层隧道安全施工提供技术支撑。

1　工程背景

1.1　工程概况

收稿日期：2022-08-05

硬梁包水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县境内的大渡河干流上，该工程引水隧洞规模较大，设计及施工技术难度均较大，为关键控制性工程。断面大（衬砌后内径 13.1 m），沿线地质条件复杂。引水隧洞沿线瓦斯沟、磨子沟、茶园沟、加郡沟等跨沟洞段岩体埋深相对较小，同时岩体蚀变软化使得洞室围岩稳定问题突出。针对软弱蚀变岩体，采用分层开挖的方式以保证施工的稳定性，隧洞分为上层、中层与底层三个部分，上层采用台阶法施工，中层进行左右错距开挖，底层全断面开挖。

1.2　工程及水文地质条件

根据开挖揭露与地质钻孔显示，茶园沟过沟段埋深约 110 m，沟床覆盖层相对较浅，一般深度为 40～50 m，最深 60.15 m，对应的高程为 1 266.94 m，上覆基岩厚度约 65～80 m，围岩类别以Ⅳ类为主，局部遭遇断层破碎带、裂隙密集带及软弱带岩体为Ⅴ类。加郡沟过沟段埋深约 110 m，沟床覆盖层相对较浅，一般深度为 30～40 m，最深 53.5 m，对应高程为 1 287.9 m，上覆基岩厚度约 70～80 m，隧洞上覆岩体较薄，岩体完整性较差，呈块裂结构，以Ⅳ类为主，局部遭遇裂隙密集带及软弱带岩体为块裂至碎裂结构，岩体为Ⅳ、Ⅴ类。

1.3　隧洞支护方案

按照设计要求，每一开挖进尺前在隧洞 120° 范围内布设 ϕ42 mm、长 $L=4.5$ m、环向间距 0.3 m，外插角 10°左右、纵向间距 2.0 m 的超前注浆小导管。初期支护采用 I20a 型钢，纵向间距 1.0 m 进行支撑，围岩与钢支撑之间挂 Φ6 钢筋网，钢筋网间排距 15 cm×15 cm；开挖暴露的围岩表面首先初喷混凝土 5 cm 进行封闭，在设立钢支撑完毕后，及时喷射混凝土 22 cm 覆盖钢支撑 2 cm，初期支护完成后，Ⅳ类岩体隧洞直径达到设计的 7.55 m。系统锚杆内插于两榀钢支撑之间，间距 1.5 m，排距为 1.0 m，隧洞顶拱 120 ° 附近左右两侧拱脚处各设 1 排 Φ32、$L=9$ m 的锚杆，240 ° 位置左右底脚处各设 2 排 Φ32 mm、长度 $L=9$ m 的锚杆，其余位置布设 Φ28 mm、长度 $L=6$ m 的锚杆，锚杆外露于喷混凝土表面 0.3 m。初期支护示意图见图 1。

2　三维数值模型

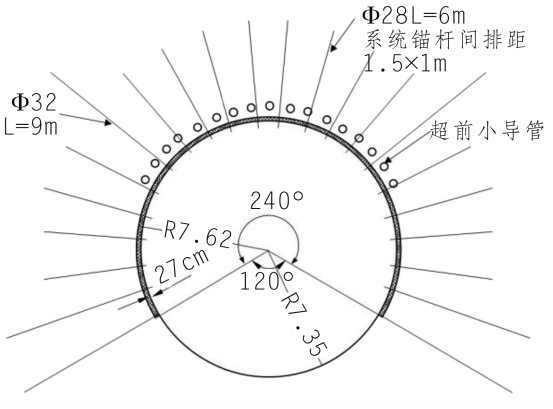


图 1　初期支护示意图

规定沿隧道开挖横断面中线向右方向为 X 轴正向，隧道纵向线路里程增大的方向为 Y 轴正向，垂直向上为 Z 轴正向。两个计算模型在 X、Y 方向的尺寸为 200 m×180 m，模型通达地表，仅考虑自重应力影响。茶园沟过沟模型为引 2，里程 10＋252.326～10＋432.326，模型网格划分单元 480 112 个，节点 458 159 个；加郡沟过沟模型为引 2，里程 11＋671.950～11＋851.950 模型网格划分单元 465 252 个，节点 425 895 个。

围岩采用摩尔－库伦模型，初期支护的刚性支护作用采用实体单元模拟，开挖过程中，初期支护主要包括初喷混凝土、钢拱架与锚杆的组合[4]。钢拱架在初期支护时可以起到立竿见影的支撑效果，其模拟方法可以根据抗弯刚度等效原理来提高喷射混凝土的弹性模量[5]。二次衬砌作为长期的安全储备，在计算建模时不予考虑。围岩及材料物理力学参数见表 1。

3　施工稳定性三维数值模拟结果

根据目前实际施工方案，对茶园沟过沟段的数值模拟结果进行总结，模拟上层与中层开挖后，围岩变形、塑性区，对施工过程、安全监测等提供建议。

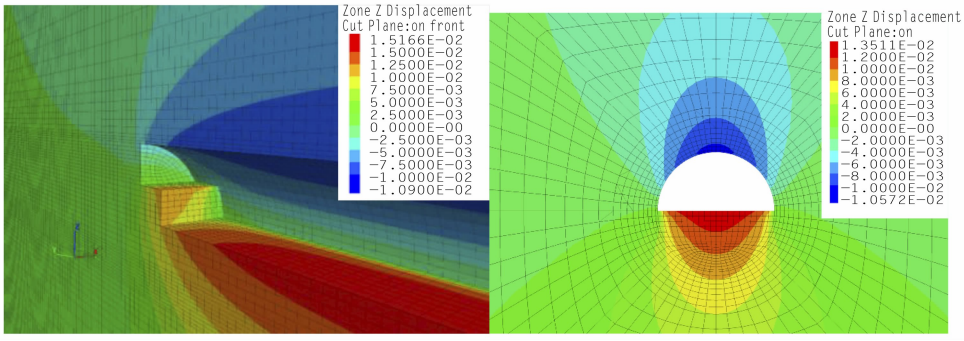
3.1　拱顶沉降

为消除边界效应，取计算模型沿纵向长度 90 m 的地方进行切分，分别比较上层开挖后与中层开挖后的拱顶沉降大小及变化规律，得出开挖对拱顶沉降影响大小的初步认识，掌握隧洞在开挖后的变形规律，上层开挖拱顶沉降位移云图见图 2。

根据数值计算结果显示，上层采用台阶法进行施工，拱顶沉降大约在 1.05 cm 左右。中层开挖拱顶沉降见图 3。

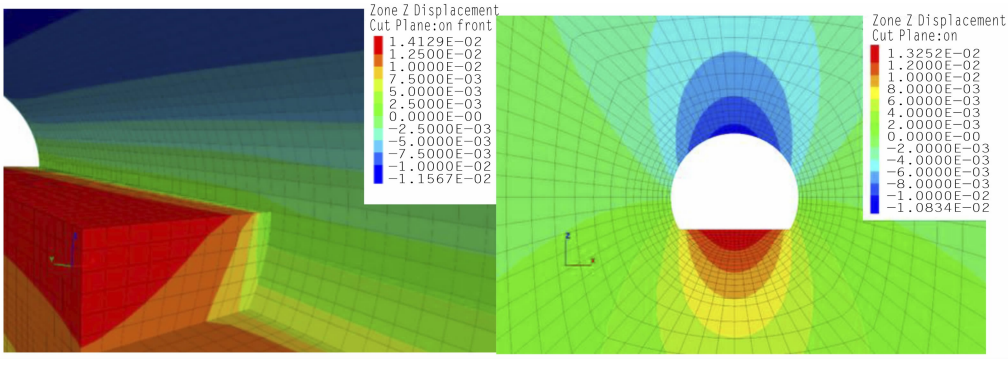
表 1　围岩及材料物理力学参数表

材料类型	密度 /kg·m^{-3}	弹性模量 /GPa	泊松比	内聚力 /MPa	内摩擦角 /°
Ⅳ类围岩	2 500	4	0.3	0.6	35
I20a 型钢		206	0.2		



(a) 三维分布　　(b) 横截面

图 2　上层开挖拱顶沉降位移云图



(a) 三维分布　　(b) 横截面

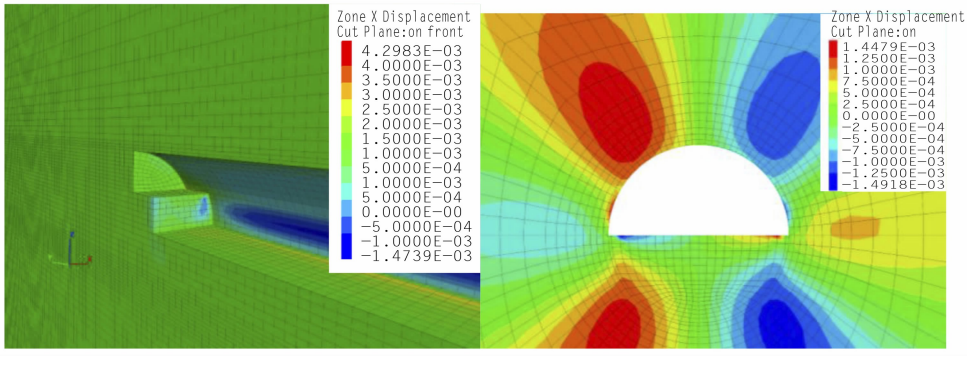
图 3　中层开挖拱顶沉降

根据数值计算结果显示，中层开挖后拱顶沉降大约在 1.08 cm，与上层开挖后沉降值相比，沉降值增加 0.03 cm，增量不明显，可见对拱顶沉降大小影响最大的时机还是在上层开挖施工过程中。

3.2　水平收敛

为得到上层及中层开挖对隧洞水平收敛值的影响，分别对两种工况下的水平位移进行比较，上层开挖后的水平位移云图见图 4。

根据数值计算结果显示，在上层开挖后，水平



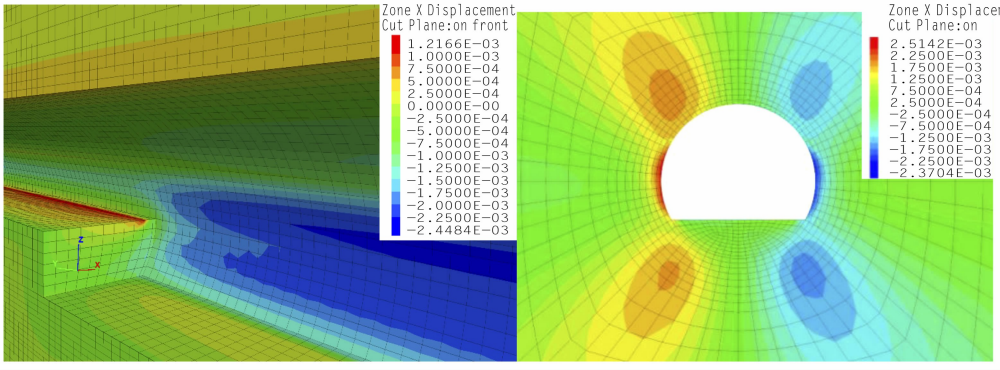
(a) 三维分布　　(b) 横截面

图 4　上层开挖水平位移云图

位移数值大小远远小于拱顶沉降，最大水平收敛值为 1.49 mm，并且云图显示，最大水平收敛位置出现在边墙位置，水平位移变形有往隧洞内挤压的趋势，其次较大水平位移出现在拱肩位置，在 1.45 mm。中层开挖后的水平位移云图见图 5。根据中层开挖结束后的水平位移云图显示，水平位移有了明显的增长，最大水平收敛位置出现在隧洞 180°～240°附近的位置，达到了 2.51 mm，增量达到了 1.05 mm，可见于中层开挖对于隧洞水平位移有明显的影响，在后期进行中层开挖时，应特别注意隧洞水平收敛的监测，对变形较大的区域加强支护。

3.3　塑性区分布

从围岩塑性区的变化情况来分析开挖步骤对隧道稳定性的影响，分别计算上层开挖后塑性区分布情况与中层开挖后塑性区分布情况，以此直观认识围岩塑性区在开挖过程中的变化规律。围岩塑性区深度统计情况见表 2。



(a) 三维分布　　(b) 横截面

图 5　中层开挖引起的水平位移云图

表 2　围岩塑性区深度统计表

工　况	拱顶 /m	拱肩 /m	边墙 /m
上半圆开挖	0.5	1.4	1.2
下半圆第一层开挖	0.5	2.6	2.8
增幅 /%	0	86	133

根据数值计算结果显示，可以直观看到，开挖影响的塑性区深度较深的地方出现在拱肩和边墙位置，在上层开挖过程中塑性区深度分别达到了 1.4 m 和 1.2 m，而拱顶范围内的塑性区深度浅，只有 0.5 m，可见开挖过程中，拱顶范围内岩体受影响较小。

在中层开挖后，拱顶范围内塑性区深度没有产生变化，而边墙周围塑性区深度变化明显，增加了 1.6 m，拱肩位置塑性区深度也有明显的增大规律，增加了 1.2 m，这一规律与中层开挖后的水平收敛规律相似，认为中层开挖后，对隧洞边墙位置及拱肩位置的影响最大。

3.4　能量聚集特征

物质破坏是能量驱动下一种状态失稳现象，软岩高地应力隧道稳定性与开挖后岩体储存应变能大小有直接关系，如果总应变能大于极限储存能，结构就有失稳可能。追踪单元能量过程，其主应力空间岩体总能量可具体表示为：

$$U=\int_0^{(\varepsilon_1)}\sigma_1\,d\varepsilon_1+\int_0^{\varepsilon_2}\sigma_2\,d\varepsilon_2+\int^{\varepsilon_3}\sigma_3\,d\varepsilon_3 \quad (1)$$

式中　U 为围岩聚集的能量大小，J；σ_1、σ_2、σ_3 为围岩开挖后的三个主应力大小，Pa；ε_1、ε_2、ε_3 为围岩变形量。

4　结　语

(1)上层开挖过程中，对拱顶沉降值具有明显的影响，最大沉降值 1.05 cm，而对隧洞水平收敛值影响较小，仅有 1.49 mm；在中层开挖后，对拱顶沉降值影响很小，主要影响的是水平位移大小，由 1.49 mm 增加至 2.51 mm，增量达到了 1.05 mm，后期中层开挖应关注水平位移的监测。

(2)围岩塑性区在中层开挖后，拱顶范围内塑性区影响不大，隧洞周身均有塑性区的增长，变化

（下转第 104 页）

抛投强度为 949 m^3/h。

3.6　基坑排水

初期排水包括围堰闭气后基础及围堰渗水、基坑积水等。截流闭气后，初期排水总量约 35.55 万 m^3，按 3 d 排干计算，初期排水强度约 5 000 m^3/h。

基坑经常性排水包括施工期降水、基础和围堰渗水、施工弃水等组成。基坑经常性排水最大强度为施工期降水与围堰渗水之和，按 1 d 排干计算，最大排水强度约为 4 300 m^3/h。

3.7　下闸蓄水及下游供水

首部枢纽工程在第六年 5 月底具备挡水条件，作为工期控制线路的引水发电系统，在第六年 6 月底具备下闸蓄水条件。由于该工程水库库容很小，且在主汛期下闸，蓄水历时很短，可根据实际施工进度情况，随时进行蓄水。首部枢纽施工期基本不改变原河床流量，不影响下游水电站和沿河各县各部门的生产、生活供水。

4　结　语

设计从工程水文气象、地形地质及工程枢纽布置等方面综合分析选定该工程的施工导流标准、方式及导流建筑物设计。围堰结构设计中，除主河床上下游围堰外，其余围堰防渗采用堰基高喷防渗墙＋堰体土工膜防渗形式，有效节省了导流工程量。通过在出口布置混凝土框格式地下连续墙，进行防冲、防淘刷保护，保证了导流明渠结构和下游出口的安全。

参考文献：

[1]　中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司硬梁包水电站可行性研究报告[R]. 报告编号：CD410 KX-13-9(1)，2014.

[2]　水电工程施工组织设计规范[S].

[3]　水电工程施工导流设计规范[S].

[4]　伍秀云. 某水电站工程施工导流设计[J]. 中国水运，2019，19(11). 204-205.

[5]　胡田清，赵颖，朱信波. 金沙水电站导流明渠设计及出口防冲措施研究[J]. 四川水力发电，2018，37(2)：21-24.

作者简介：

张永清(1988-)，男，甘肃武威人，高级工程师，硕士，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，从事水利水电工程施工组织设计工作；

郭志忠(1968-)，男，青海西宁人，正高级工程师，学士，四川华能泸定水电有限公司，从事水利水电工程管理工作；

程保根(1982-)，男，江西新建人，学士，高级工程师，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，从事水利水电工程施工组织设计工作；

相昆山(1988-)，男，山东临沂人，硕士，高级工程师，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，从事水利水电工程施工组织设计工作；

袁　鹏(1988-)，男，湖北荆门人，四川华能泸定水电有限公司，工程师，学士，从事水利水电工程管理工作.

(责任编辑：吴永红)

(上接第 96 页)

明显的区域主要在边墙和拱肩位置，边墙周围塑性区深度变化明显，增加了 1.6 m，拱肩位置塑性区深度也有明显的增大规律，增加了 1.2 m。

(3)上半圆开挖后，能量主要集中在墙脚附近。下半圆第一层开挖后，围岩表层发生塑性屈服，导致能量集聚在边墙内部，需加固围岩内部。

三维数值模拟时，除采用一般隧洞变形与塑性区分析方式，还采用了能量计算的方式，对围岩内部能量聚集特征进行了分析总结，可直观看到隧洞开挖后由于应力重新分布原因，导致的围岩内部能量分布的具体形式，可结合隧洞变形与塑性区分析，对施工期间现场监测与安全提供建议。

参考文献：

[1]　吴庆良，吴梦军，方林，等. 非均匀应力场作用下圆形水工隧洞开挖与支护参数设计[J]. 农业工程学报，2021，37(15)：78-85.

[2]　张晓莉，吕爱钟，王少杰. 正交各向异性非圆形水工隧洞的应力解析解[J]. 岩石力学与工程学报，2017，36(S2)：3808-3815. DOI：10.13722/j.cnki.jrme.2016.1615.

[3]　刘闽龙，陈士海，孙杰，等. 浅埋小净距隧道爆破损伤探测及数值模拟分析[J]. 爆炸与冲击，2021，41(11)：149-157.

[4]　王明胜. 强风化炭质板岩隧道大变形控制技术研究[J]. 铁道工程学报，2021，38(7)：35-39＋47.

[5]　铁道部第二勘察设计院. TBJ10003－2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京：中国铁道出版社，2001.

作者简介：

陈　涛(1977-)，男，吉林辽源人，四川华能泸定水电有限公司，高级工程师，学士，从事水利水电工程方面工作；

袁超义(1981-)，男，河南南阳人，四川华能泸定水电有限公司，高级工程师，硕士，从事水利水电工程管理工作；

薛瑞华(1998-)，男，辽宁沈阳人，东北大学，硕士，从事采矿工程方面工作；

佟　强(1996-)，男，辽宁沈阳人，东北大学，硕士，从事土木水利方面工作；

何本国(1984-)，男，辽宁沈阳人，东北大学，教授，博士，从事隧道工程方面工作.

(责任编辑：吴永红)