

深埋软硬共存隧洞变形特征分析及施工对策*

张传庆¹ 张洋² 周辉¹ 刘宁² 孙峰³

(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.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 杭州 310014; 3.中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430063)

摘要: 复合地层中深埋隧洞围岩变形特征复杂, 软硬共存类复合地层中围岩力学特性差异巨大, 开挖力学响应极其复杂, 给现有设计和分析理论提出了重要挑战。锦屏二级水电站深埋引水隧洞西端3#隧洞绿泥石片岩洞段围岩即共存绿泥石片岩和大理岩, 软岩挤压和硬岩破裂共生, 且二者相互影响, 通过现场详细地质勘察和地质条件分析, 结合临洞监测成果分析和数值模拟分析, 研究掌握了围岩变形特征, 基于此, 考虑后续施工可控变形量和支护厚度得出挤压洞段扩挖尺寸, 并给出了相应洞段后续施工风险的应对策略。为此类深埋隧洞工程相关问题的认识和解决提供了重要参考。

关键词: 复合地层; 深埋隧洞; 软硬共存; 变形特征; 应对策略

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)04-1040-07

Analysis on Deformation Characteristic of Surrounding Rock Mass in Deep Tunnel Buried in the Hard and Soft Coexistence Formation and Coping Strategy for Construction Risk

Zhang Chuanqing¹ Zhang Yang² Zhou Hui¹ Liu Ning² Sun Feng³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation limited, Hangzhou, Zhejiang 310041; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group CO., LTD., Wuhan, Hubei 430063)

Abstract: The deformation characteristic of surrounding rock mass is complex in deep tunnels buried in compound stratum. Especially for the compound stratum with hard and soft rock mass coexistence, the differences of their mechanical properties are huge. The very complicated excavation mechanical responses are expected. So, the important challenges are put forward to the existing theories of design and analysis. Number 3 tunnel at the west end of the deep headrace tunnels in Jinping II hydropower station is a typical case with coexistence of chlorite schist and marble. The squeezing occurring in soft rock and the rupture occurring in hard rock developed at the same time. And the interaction between them was inevitable. Firstly, the detailed geological survey and the analysis of geological conditions were conducted. Then, the deformation characteristic of surrounding rock mass was studied based on the analysis of the monitoring data and the numerical simulation results. Finally, the expanding section size was obtained through considering the controlled deformation occurring in the subsequent constructions and the lining thickness. The coping strategies were presented according to the construction risks. The results obtained will provide very important references for the similar deep tunnels buried in compound stratum.

Keywords: compound stratum; deep tunnel; coexistence of soft and hard rock mass; deformation characteristic; coping strategy

* 收稿日期: 2016-09-15(修改稿)

作者简介: 张传庆(1977-) 男, 山东平原人, 博士, 研究员, 主要从事地下工程高应力灾害调控机制与方法方面的研究工作。E-mail: cqzhang@whrsm.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51279201); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046902)

0 引言

深埋软岩隧洞挤压变形问题是岩石地下工程中的传统难题^[1-4],特别是挤压发生后的施工处理和变形控制问题更加复杂,一旦控制不好,将可能再次发生挤压^[5],不但前功尽弃,甚至可能导致围岩稳定状态持续恶化。这给软岩工程分析和设计理论提出了巨大挑战。

复合地层中的深埋隧洞由于其赋存地质条件复杂,同时存在多种地层,地层产状、厚度和出露位置均对围岩开挖力学响应和围岩稳定产生重要影响^[6]。另外,各地层性质各异,力学响应差异大^[7]。而软岩和硬岩共存的情况则是复合地层中最为复杂的一种,软岩挤压变形和硬岩损伤破裂将在此类深埋隧洞中共生,这两种岩体力学特性差异巨大,前者在工程开挖中主要表现为围岩变形和塌方,而后者则变形较小,主要表现为围岩损伤破裂、片帮、剥落等脆性破坏,且二者存在相互影响。故,准确把握此类隧洞工程围岩的变形特征是科学应对围岩和支护变形破坏问题的基础。

锦屏二级水电站引水隧洞西端 3#隧洞部分洞段即为绿泥石片岩和大理岩共存的情况,上层开挖后局部出现挤压变形,为保证扩挖和下层开挖过程中围岩的变形稳定,笔者在现场地质勘察基础上,结合 1#、2#和 4#隧洞相应洞段的变形分析,采用数

值模拟方法分析了 3#隧洞软硬共存情况下围岩变形特征,考虑后续施工变形量和支护厚度给出扩挖断面尺寸,并给出了后续施工风险的应对策略。研究成果为类似地下工程相关问题的研究提供重要参考。

1 深埋隧洞群复杂地质条件

1.1 工程概况

锦屏二级水电站深埋引水隧洞群包括 4 条引水隧洞,由北向南依次为 1#、2#、3#和 4#引水隧洞,如图 1 所示^[8-10]。全洞线 80%洞段埋深在 1 500 m 以上。引水隧洞西端采用钻爆法开挖,四心马蹄形断面,隧洞开挖直径 13~13.8 m,部分绿泥石片岩洞段开挖高度为 14.3 m。施工工序分上下两层开挖,上层先开挖 8.5~8.9 m,然后完成下层 4.5~4.9 m 开挖。

1#和 2#引水隧洞开挖过程中分别揭露出绿泥石片岩(简称绿片岩)地层。绿片岩洞段埋深一般在 1 550~1 850 m 之间,自重应力约为 41~50 MPa,而绿片岩单轴抗压强度的平均值为 38.8 MPa,饱和抗压强度为 19.47 MPa,相对来讲,该洞段属于极高应力区。绿片岩干燥条件下单轴压缩试验获得的弹性模量为 13.18 GPa,饱和时为 3.54 GPa,弹性模量低、遇水软化效应突出。高应力条件下围岩以塑性剪切破坏为主,现场主要表现为以塑性挤压变形。

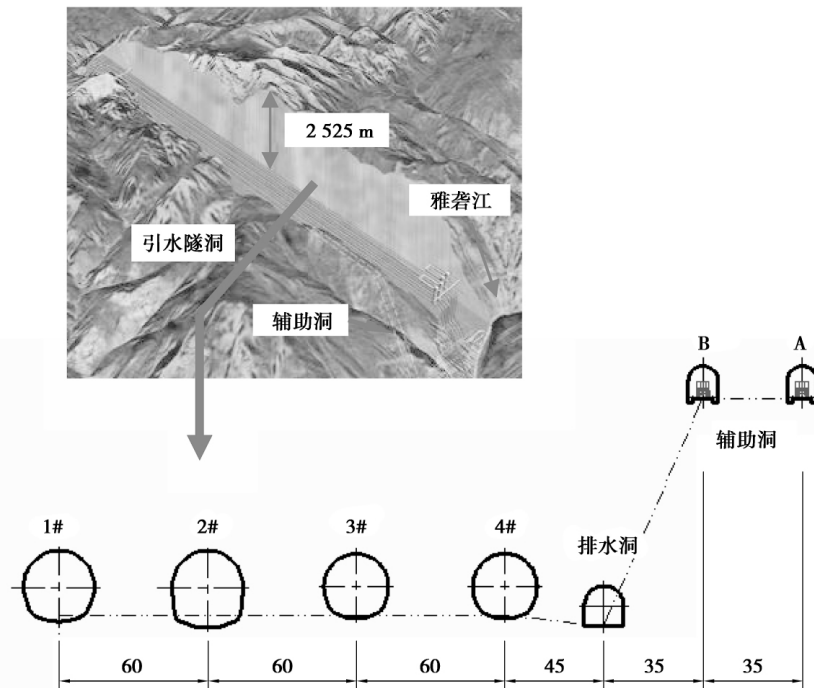


图 1 锦屏二级水电站隧洞群布置图(单位:m)

Fig.1 Layout of tunnels at the Jingping II Hydropower Station(unit:m)

1.2 复合地层隧洞群的复杂地质条件

绿片岩地层在 1#隧洞重点出露洞段为引(1) 1+537~1+800 段, 2#隧洞重点出露洞段为引(2) 1+613~1+755 段。引水隧洞引(3) 1+650~1+720 段岩性为 T_{zz} 杂谷脑组白色中粗晶大理岩夹灰绿色绿片岩条带或呈互层状, 绿片岩层厚 10~40 cm, 其中, 桩号引(3) 1+656~1+669 北侧边拱及边墙、引(3) 1+672~1+690 北侧边拱及引(3) 1+700~1+708 北侧边拱及边墙岩性以灰绿色绿片岩为主, 局部夹少量白色中粗晶大理岩。

3#隧洞北侧边墙及边拱处的绿片岩自稳性差, 不及时支护容易出现坍塌, 岩体抗压强度较低, 为 IV 类围岩。2009 年 3 月 9 日, 3#引水隧洞引(3) 1+670~1+690 段北侧边拱出现坍塌, 坍塌方量约 150 方左右, 坍塌体主要以小块状为主, 局部大块状, 如图 2 和 3 所示。大理深高地应力和围岩软弱破碎是导致塌方的主要原因, 坍塌处后可见岩石内部发育宽约 3 m 左右绿片岩。相应洞段南侧边墙则主要为杂谷脑组大理岩。

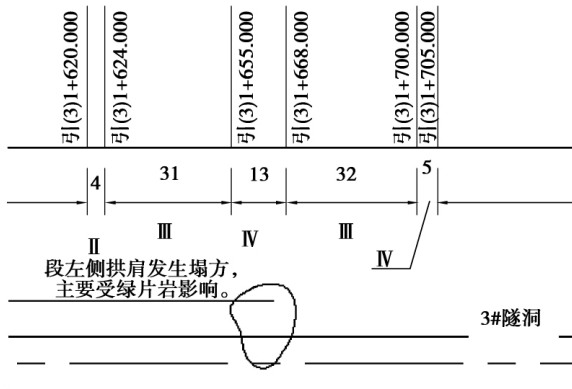


图 2 引(3) 1+650~1+720 洞段围岩分类情况

Fig.2 Distribution of surrounding rock mass classification in section 1+650~1+720 in #3 tunnel



图 3 引(3) 1+670~1+690 段北侧边拱出现坍塌

Fig.3 Collapse occurring on the north side arch in section 1+670~1+690 in #3 tunnel

根据华东勘测设计研究院现场地质勘察可知, 引水隧洞出露的绿片岩地层存在次一级背斜, 岩层受挤压而产生明显的扭曲、揉皱现象, 由于受褶皱影响, 层理多扭曲成与洞向小角度相交的 NNW~近 EW 向, 层理变化较大。根据绿片岩地层褶皱发育情况, 得到的绿片岩分布平剖图如图 4 所示。可见, 绿片岩由 1#隧洞向南侧延伸, 在 3#隧洞北侧边墙出露。1#和 2#隧洞绿片岩洞段较长, 且整个断面均为绿片岩, 4#隧洞相应洞段则全部为杂谷脑组大理岩, 而 3#隧洞较为复杂, 南北两侧地质条件差异巨大, 北侧为 IV 类绿片岩, 南侧为坚硬的 III 类杂谷脑组大理岩, 南北侧围岩稳定性不同, 变形发展也将受地质条件的深刻影响。

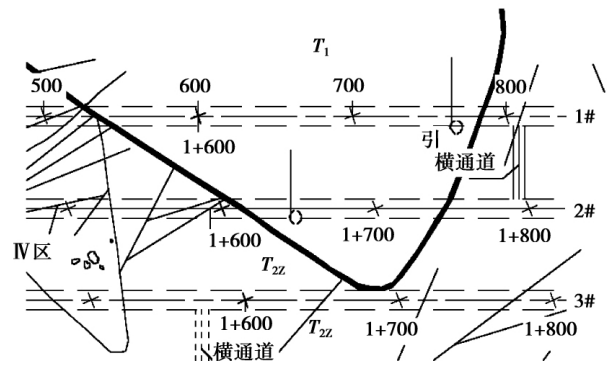


图 4 引水隧洞地质结构示意图

Fig.4 Sketch map of geology structure in headrace tunnels

2 深埋隧洞群现场变形特征分析

4 条引水隧洞的地质条件存在差异, 特别是 3#隧洞同时出现两种岩体, 且性质差异巨大, 但 3#隧洞缺乏现场变形监测数据, 给准确理解复杂地质条件下 3#隧洞围岩的变形特征带来很大困难。为此, 本节通过分析 1#和 2#隧洞绿片岩地层以及 4#隧洞大理岩相似地质条件围岩变形情况间接认识 3#隧洞围岩变形特点。

2.1 3#隧洞绿片岩出露洞段支护参数

3#隧洞开挖洞径为 13.0 m, 设计支护参数包括开挖后初喷厚为 5~8 cm 的钢纤维混凝土, 挂钢筋网, 布置间距 1.0 m 的格栅拱架; 复喷厚 12~15 cm 的钢纤维混凝土, 系统布置直径为 32 mm 的普通砂浆锚杆, 长度为 6.0/9.0 m。其设计支护强度与 1#、2#隧洞绿片岩洞段所采用的支护强度基本一致。

2.2 与3#隧洞地质条件相似其他隧洞围岩变形

图5和图6为分别统计的1#和2#隧洞与3#隧洞地质条件相似的绿片岩洞段沿洞轴线围岩最大变形。可见,1#隧洞引(1)1+560和1+760附近洞段与2#隧洞引(2)1+620和1+730附近洞段围岩最大变形的分布情况基本一致,围岩最大变形均介于0.07~0.52 m之间,其中1#隧洞引(1)1+560和1+760附近洞段最大变形平均为0.274 m,标准方差为0.1,而在2#隧洞的引(2)1+620和1+730附近洞段最大变形平均为0.283 m,标准方差为0.12,二者分布情况基本一致。

2#隧洞引(2)1+620和1+730附近洞段较1#隧洞引(1)1+560和1+760附近洞段变形的空间性更强,尤其2#隧洞围岩最大变形值从引(2)1+680到1+780逐步降低,且降低较多,而1#隧洞围岩最大变形沿洞线分布相对均匀。

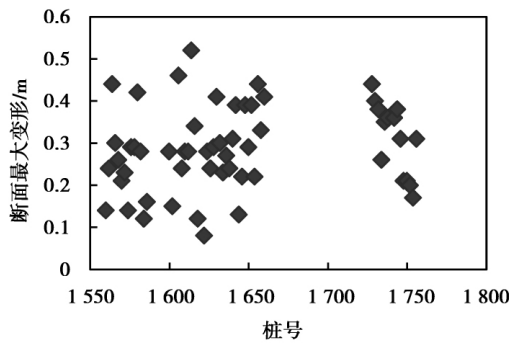


图5 引(1)1+560至1+760及附近洞段围岩最大变形统计

Fig.5 Collection of the maximum deformation of surrounding rock mass in section 1+560 to 1+760 or nearby section in #1 tunnel

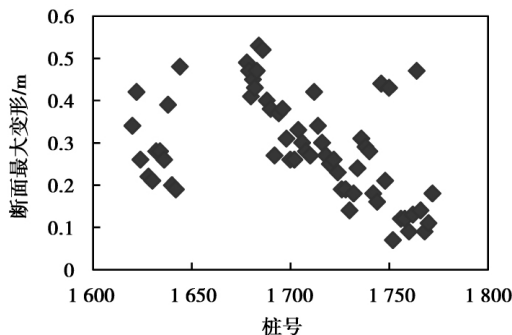


图6 引(2)1+620至1+780及附近洞段围岩最大变形统计

Fig.6 Collection of the maximum deformation of surrounding rock mass in section 1+620 to 1+780 or nearby section in #2 tunnel

4#隧洞相应洞段为Ⅲ类大理岩洞段,现场未对围岩变形进行监测或测试,但根据埋深条件,可参考引水隧洞东端大理岩洞段的变形。1#隧洞东端预埋多点位移计M2-15+505-1监测到掘进过程中围岩的总位移仅为7 mm,变形非常小,现场围岩响应以损伤破裂为主,变形问题不突出,这与4#隧洞西端开挖揭露情况相同。

3#隧洞施工过程中,虽然现场也出现了挤压变形侵占设计断面的问题,但仅限于北侧出露绿片岩的部分,故3#隧洞北侧边墙和边拱呈现出软岩变形特征,而南侧边墙和边拱则呈现出硬岩开挖响应特征。

3 复杂地质条件下隧洞变形分析

虽然上节通过1#、2#和4#隧洞间接认识了地质条件相似的软岩和硬岩洞段围岩变形特征,但3#隧洞同时存在软岩和硬岩,二者变形是孤立还是存在相互影响尚难得知。为了把握围岩变形程度、合理评价围岩稳定性,本节在认识1#、2#和4#隧洞围岩变形和力学性质的基础上,采用数值模拟方法分析了复杂地质条件下3#隧洞开挖过程中围岩变形情况,这也可为该洞段扩挖和落底开挖过程中围岩变形控制奠定基础。

3.1 围岩力学参数分析

由图4可见,该洞段围岩大部分为Ⅲ类以上 T_{2Z} 大理岩,个别洞段由于其北侧边拱处绿片岩发育,稳定性较差,故定为Ⅳ类围岩。在该洞段由于缺乏有效的监测数据,故难以直接通过参数反演的方式获得其围岩参数,但可以通过与1#和2#隧洞类似围岩条件的类比获得。由于该洞段处发育次一级背斜,从岩层走向来分析,3#隧洞的引(3)1+650~1+720洞段岩性与2#隧洞的引(2)1+680~780洞段最为接近。从岩性来看,越靠近3#隧洞,绿片岩中夹杂的大理岩越多,强度越高,但由于3#隧洞该洞段处于背斜核部,围岩较其他部位更为破碎。故可认为该洞段绿片岩的围岩宏观力学性质与1#、2#隧洞中绿片岩挤压变形洞段接近。

绿片岩属于典型软岩,可采用基于Mohr-Coulomb准则的理想弹塑性模型进行计算。现场开挖后一定范围内围岩挤压破裂甚至破坏,同时通过一定支护形式提高了其承载能力,但其宏观力学

性质与未扰动岩体可能存在一定差别。为此,本文将计算范围内围岩分为两部分,即未扰动原岩体和支护加固体。依据文献 [11] 分析成果,绿片岩未扰动原岩体的弹性模量采用 5.04 GPa,黏聚力为 1.85 MPa,摩擦角为 28.52°,而支护加固体的弹性模量为 2.60 GPa,黏聚力为 1.55 MPa,内摩擦角为 26.40°。

依据文献 [11],Ⅲ类 T_{2z} 大理岩采用 GPSEdshs 本构模型^[12],其力学参数由其他纯 T_{2z} 大理岩洞段反演获得,如表 1 所示。

表 1 Ⅲ类 T_{2z} 大理岩围岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of Ⅲ grade rock mass of T_{2z} marble

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	初始	残余	初始	最终	粘聚力 力临 界塑 性应 变/ $\%$	内摩 擦角 临界 塑性 应变/ $\%$
		粘聚力 c_0/MPa	粘聚力 c_r/MPa	摩擦角 $\varphi_0/(\text{°})$	摩擦角 $\varphi_r/(\text{°})$		
15	0.23	11.2	1.2	28.97	44	0.4	0.9

3.2 围岩变形分析

本文建立了 4 条隧洞组成的洞群模型,如图 7 所示,可见,1#和 2#隧洞整个断面围岩为绿片岩,而 4#隧洞为大理岩,而 3#隧洞则同时存在两种围岩。该洞段的地应力条件如表 2 所示,表中数值约定拉正压负。

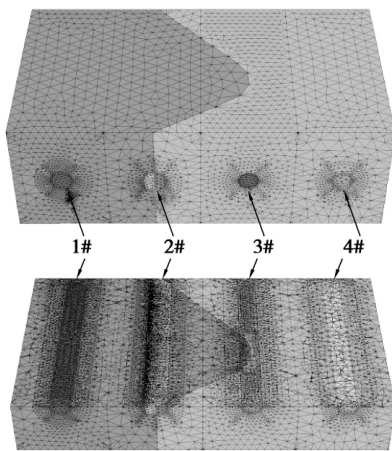


图 7 锦屏隧洞群网格模型

Fig.7 Mesh model of Jinping tunnels

表 2 分析洞段地应力分量 (单位: MPa)

Table 2 In situ stress components in the section analyzed (unit: MPa)

σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{xz}
-32.76	-39.23	-37.64	-4.21	4.68	2.84

计算获得 3#隧洞上层开挖后北侧边墙发育绿片岩洞段围岩最大变形为 0.51 m,发生在绿片岩发育的北侧边拱处,这是由地应力的方向决定的,且该部位局部化变形较为突出。3#隧洞南侧边墙处围岩也出现了较大的变形,变形达到了 0.21 m,而 4#隧洞 T_{2z} 大理岩洞段围岩变形仅为 0.11 m。

由此可见,3#隧洞北侧边墙发育的绿片岩不仅在北侧边墙处引起了较大的围岩变形,而且对南侧边墙的影响也非常明显,给围岩稳定性带来了非常不利的影 响。而 3#隧洞北侧边墙发育的绿片岩对隧洞拱顶变形的影响相对较小,围岩变形仅为 0.08 m,基本不会影响围岩的稳定性。

4 扩挖断面尺寸分析

由于 3#隧洞上层开挖后北侧边墙部位业已发生挤压变形,侵占了衬砌断面,故在下层开挖之前需进行扩挖,而扩大断面尺寸需要重点考虑下层开挖对北侧边墙变形的影响。

如图 8 计算结果所示,下层开挖后,3#隧洞北侧边墙围岩最大变形由 0.51 m 增加为 0.58 m,增加了 0.06 m。南侧边墙处的围岩变形也由下层开挖前的 0.21 m 增加为之后的 0.29 m,增加了 0.08 m。而 4#隧洞南侧边墙变形由下层开挖前的 0.11 m 增加为之后的 0.17 m,增加了 0.06 m。由此可见,下层开挖对 3#隧洞北侧边墙发育绿片岩洞段围岩稳定性影响较大。南侧边墙变形虽也增加,但总体变形量不大。

根据下层开挖后引起的变形增量,同时考虑到地质条件导致的变形变异性,可将隧洞围岩扩挖及下层开挖后的最大变形定为 0.1 m。考虑 0.3 m 厚度的初期支护(喷层+格栅拱架)和 0.6 m 厚钢筋混凝土二次衬砌(初次衬砌和二次衬砌厚度之和达到 0.9 m),扩挖洞径可定为 13.8 m。

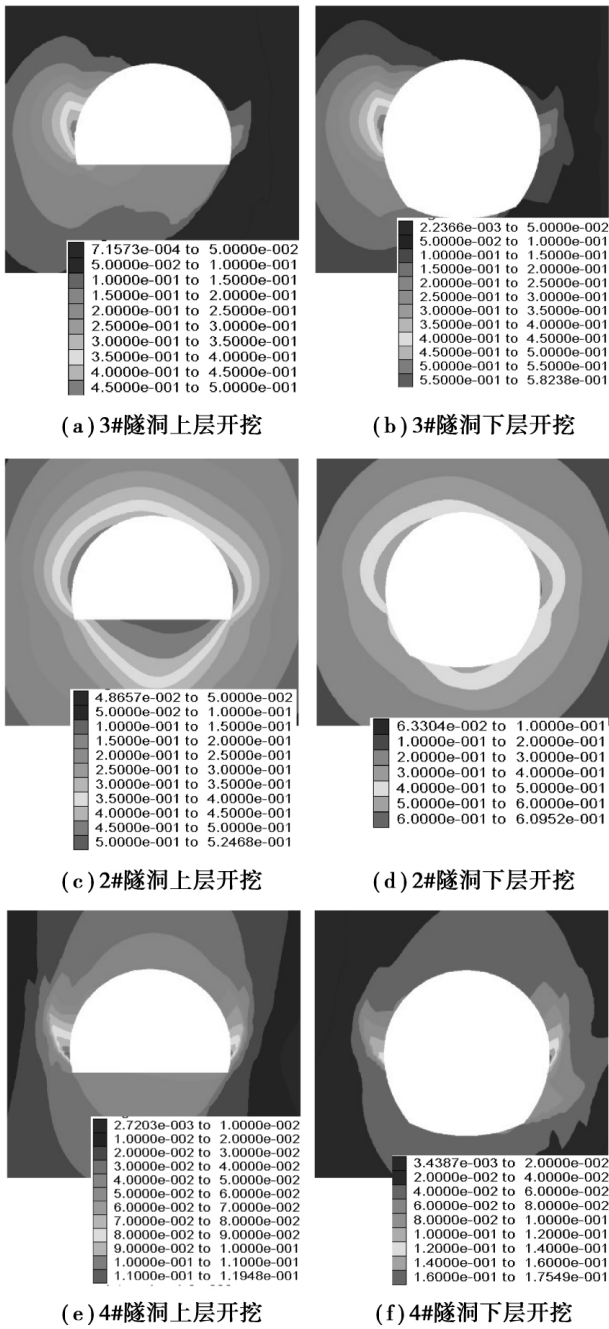


图 8 引水隧洞围岩变形特征

Fig.8 Deformation characteristic of surrounding rock mass in headrace tunnels

5 扩挖和下层开挖风险及应对策略

上述分析可知 3#隧洞绿片岩洞段扩挖和下层开挖后围岩变形可控性较好,但其前提是严格按设计要求控制施工进尺、及时支护加固,并针对施工中可能出现的各种问题科学制定应对策略。

绿片岩本身强度受水的影响非常大,试验发现绿泥石片岩的强度软化系数为 0.5 左右,遇水

软化效应明显。现场勘察发现,1#隧洞部分洞段扩挖揭露出的绿泥石片岩非常潮湿,甚至可以徒手捏碎。而 3#隧洞揭露出的岩体含水率较大,在引(3)1+704 北侧边拱沿水管渗流水,水量 0.2L/s,现场局部存在较深积水,将对拱脚和上部围岩稳定性造成影响,同时可能会降低底板围岩的承载能力。因此,3#隧洞在扩挖和下层开挖时需要地对地下水和施工用水及时排放,并及时封闭开挖面,避免长时间暴露。

1#隧洞扩挖施工经验表明,尽管一次扩挖距离非常短,但是仍然造成了相邻未扩挖段拱脚处挤压变形的进一步加大,如图 9 所示。除了扩挖导致相邻支护约束作用的消失外,这种状况也与该处长期积水,围岩强度和变形模量不断减小有关。因此,3#隧洞扩挖后应当及时进行拱架支护,并加强拱架间的横向连接。

计算发现 3#隧洞北侧边墙产生了较大变形,且该处变形有着很明显的局部性特点,其他部位变形要相对较小。若不对其进行有效控制,有可能造成二次衬砌局部受压过大而发生开裂的问题。因此,应加强对北侧边墙的支护。

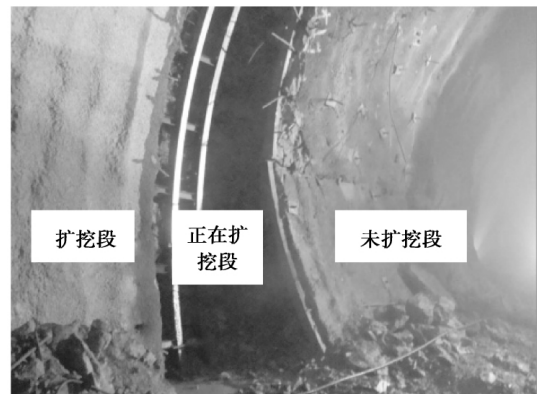


图 9 1#隧洞未扩挖段拱脚严重挤压变形

Fig.9 Serious squeezing deformation occurring at the arch foot in the no expanding section

为避免后续施工中再次出现挤压或围岩和支护失稳问题,应当增加收敛监测断面,及时监测分析围岩变形发展情况,掌握围岩稳定状态。

6 结论

(1) 软硬共存深埋隧洞软岩部分围岩局部变形突出,硬岩承载特征明显,硬岩部分变形大于单

纯硬岩隧洞围岩的变形。

(2) 下层开挖对软岩部分变形影响较大,而硬岩部分响应不明显。故已产生挤压隧洞开挖断面尺寸主要由后续下层开挖软岩部分产生的变形及支护厚度决定。

(3) 软硬共存地层深埋隧洞后续施工围岩稳定性控制为系统问题,二者相互影响的特征决定了其施工风险即可来自软岩、也可来自硬岩。主要对策包括及时排水、及时封闭、及时支护、短进尺、密切监测等。

致谢: 本研究得到了中国科学院青年创新促进会的资助,在此表示感谢!

参考文献(References)

- [1] Barla G. Squeezing rocks in tunnel [J]. *ISRM News Journal*, 1995(3/4): 44-49.
- [2] 何满潮, 邹正盛, 邹友峰. 软岩巷道工程概论 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1993. (He Manchao, Zou Zhengsheng, Zou Youfeng. General theory of soft rock tunnel engineering [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [3] Hoek E, Marinos P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses - Part 1: estimating rock mass strength [J]. *Tunnel and Tunneling International* 2000 33(2): 45-51.
- [4] Aydanö, Akagi T, Kawamoto T. The squeezing potential of rocks around tunnels: theory and prediction [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1993, 26(2): 137-163.
- [5] 刘志强, 宋冶, 胡元芳. 隧道挤压型变形与支护特性研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(增 1): 413-418. (Liu Zhiqiang, Song Ye, Hu Yuanfang. Study on squeezing deformation and support characteristics of tunnels [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2013, 34(Supp.1): 413-418. (in Chinese))
- [6] 张志强, 李宁, Swoboda G. 软弱夹层分布部位对洞室稳定性影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(18): 3252-3257. (Zhang Zhiqiang, Li Ning, Swoboda G. Influence of weak interbed distribution on stability of underground openings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2005, 24(18): 3252-3257. (in Chinese))
- [7] 李连崇, 刘淮海, Birkholzer Jens 等. Mont Terri 试验场 Mine-by 巷道开挖近场响应模拟分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1626-1634. (Li Lianchong, Liu Huaihai, Birkholzer Jens, et al. Numerical investigation on near field response to excavation of Mine-by niche at Mont Terri site [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1626-1634. (in Chinese))
- [8] Zhang C, Zhou H, Feng X T. An Index for estimating the stability of brittle surrounding rock mass - FAI and its engineering application [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2011 44(4): 401-414.
- [9] Zhang C, Feng X T, Zhou H. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2012 52(3): 139-162.
- [10] Zhang C Q, Feng X T, Zhou H, et al. A Top Pilot Tunnel Preconditioning Method for the Prevention of Extremely Intense Rockbursts in Deep Tunnels Excavated by TBMs [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2012 45(3): 289-309.
- [11] 周辉, 张传庆. 雅砻江锦屏二级水电站绿泥石片岩洞段围岩长期力学特性及衬砌长期安全性研究总报告 [R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013. (Zhou Hui, Zhang Chuanqing. General report of study on the long - time mechanical properties of surrounding rock mass and safety of lines in chlorite schist tunnel section in Jinping II hydropower station [R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences 2013. (in Chinese))
- [12] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008. (Huang Shuling. Study on mechanical model of brittle rock under high stress condition and its engineering applications [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese))