

钻爆法和TBM两种不同施工方法下深埋高外水压力隧洞的破坏特点及其力学机制分析

吉 锋¹ 张骞棋¹ 李鸿鸣¹ 周春宏² 高继顺¹

(1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014)

摘 要 钻爆法和TBM法是地下工程掘进的两种主要方法,其对围岩扰动程度、加固措施有显著影响。文章以四条平行分布且分别采用TBM法和钻爆法掘进的大型隧洞为研究对象,进行同一地质条件下不同开挖方法对围岩破坏的影响研究。通过大量地质资料的统计处理、力学分析,总结了围岩的破坏方式,并归纳对比两种不同施工方法对围岩影响的共性特征,包括破坏部位相同、破坏面积相近、破坏坑深相近。另外,对比了两种方法对围岩影响的差异性,包括TBM施工时二次破坏范围比钻爆法的二次破坏范围大,并且易于产生岩爆和应力型破坏,但钻爆法施工时岩体易发生结构面型破坏。在此基础上,分析了各种破坏现象的力学机制,研究成果可为同类工程的施工和加固提供参考。

关键词 隧洞 钻爆法 TBM法 破坏方式 力学机制

中图分类号:U451[·]2 **文献标识码**:A

1 引言

在地下工程中,隧道开挖产生的次生应力超过了岩体的强度,从而导致围岩发生变形破坏。能够引起隧洞围岩次生应力改变的因素很多,其中,不同的开挖方法是重要因素之一。目前隧洞开挖方式主要有TBM法和钻爆法两种,由于两种不同施工方法对围岩的扰动程度不一,导致围岩破坏类型、加固措施有显著差异性。文章通过对雅砻江某超深埋隧洞近三年的施工跟踪,收集了大量地质数据,在数理统计基础上结合力学分析,揭示不同施工方法下围岩

的变形破坏规律。

关于不同开挖方法下围岩破坏的对比研究,目前比较典型的成果包括:文献[1]报道Nishida, Matsuura曾进行过一次重要试验,在围岩为砂岩的隧道中分别采用TBM和常规钻爆法开挖,用地震折射法测定的TBM法损伤带厚度为0.3 m,而钻爆法的则高达0.6~1.3 m。吉锋^[2,3]对TBM和钻爆法不同开挖条件下的锦屏大理岩进行电镜扫描测试、声发射测试、松弛深度检测,发现TBM开挖条件下的断口多为沿晶面擦花和切晶擦花,破坏机理以剪切为主;在岩石破坏点的响应时间上,TBM施工条件下

修改稿返回日期:2015-08-24

基金项目:国家自然科学基金(51308082,51208069);四川省教育厅基金(15ZA0075)。

作者简介:吉锋(1980-),男,博士,主要从事地质灾害防治和岩石力学方面的研究工作,E-mail:jeifens@163.com。

岩石在峰值荷载附近表现出较强的变形能力;梁治安^[4]等利用声波方法在混合岩试验洞测定的钻爆法损伤带厚度也达0.77 m;尚彦军^[5]对印度、中国云南省和台湾省三个TBM遇困并被常规钻爆法所取代的隧道工程实例进行研究,分析了TBM不良运行的主要因素;李亮^[6]通过地应力对破岩影响的分析,对TBM破岩机理进行了研究;严鹏^[7]采用理论计算的方法分析圆形隧洞TBM开挖和钻爆开挖时边界上初始地应力的卸荷效应,并比较二者的破坏范围;余成学^[8]利用三维有限元方法,计算研究大型断层区超前注浆加固后在TBM开挖过程中隧洞变形稳定情况;通过统计分析,程兵锐^[9]认为在TBM掘进的隧洞中,在距离掌子面10 m的范围内破坏比较集中,在距掌子面7 m范围内开裂比较集中,在3 m范围内最为严重,并且变形破坏的最大影响深度一般为9 m;李育枢^[10]对锦屏高地应力下的层状大理岩进行了破坏模式分类; Bilgin N^[11]通过实验分析,认为岩石的单轴抗压强度与TBM掘进效率关系紧密;Acaroglu^[12]根据统计建立了预测TBM切削过程中能源需求量的模型; Fukui K^[13]通过试验建立了一个可以通过TBM切削力来进行估算岩体强度的方法; Ebrahim^[14]研究表明TBM洞壁收敛变形与岩石的破碎程度密切相关,并给出了统计公式; Khademi^[15]提出了RMR分类系统预测TBM性能模型。

从以上研究可看出,目前TBM开挖方法的影响研究主要集中在TBM掘进速率方面或TBM隧洞破岩机理方面,偏重于掘进效率研究,对围岩的破坏特征尤其是力学机制方面研究相对较弱。在我国西部的雅砻江流域,位于深切峡谷的某大型发电工程,四条引水隧洞平均长度17 km,最大埋深达2 525 m左右,水压力高达10.2 MPa,对于埋深如此之大、外水压力如此之高、地应力如此之高的地质情况,世界范围内均属罕见。其中1#、3#引水隧洞采用TBM开挖,2#、4#隧洞采用钻爆法开挖。由于四条引水隧洞平行且相距仅50 m,在相同的地质条件下,不同的施工方法为围岩破坏的对比研究提供了非常好的条件。

2 围岩变形破坏类型

根据现场调查,深埋隧洞施工中围岩破坏类型有结构面型破坏、应力型破坏、结构面-应力型破坏三类。

(1) 结构面型破坏

结构面型破坏是指破坏块体的边界由两条及其以上结构面控制,在自重作用下发生脱落。其主要发育在结构面比较发育的洞段。

(2) 应力型破坏

应力型破坏是指块体自完整岩石中产生破坏,无结构面控制,并在高地应力条件下发生松弛变形、坍塌破坏。在地应力条件下,这类变形和滞后的破坏比较普遍,大多数在距离掌子面一定距离处发生,如果松弛变形加剧,则会造成二次塌方,说明应力水平越高,发生破坏前的变形时间就越短。通过跟踪调查已经开挖的隧洞,应力型破坏主要发生在围岩较完整~完整的洞段,一般位于结构面或者层面揭露较少的部位。

(3) 结构面-应力型破坏

结构面-应力型破坏是指失稳块体的边界由结构面和完整岩石共同组成,由于高应力区的岩体屈服破坏和能量释放,因此此类破坏具有较大的破坏力。诱发结构面-应力型破坏的断裂规模往往不大,一般都是刚性接触。常见的断裂主要是单条剪性断裂或多条节理组合成的剪切带。大规模断层、特别有软弱充填物的断层一般不会诱发结构面-应力型破坏。

另外,现场有两种破坏现象比较显著,分别是岩爆和撑靴破坏,其和应力、结构面等相关。

岩爆是应力破坏中最典型的一种,具有瞬时型破坏特征,是脆性岩体内部储存有大量的弹性应变能,当储存的能量超过岩石强度时突然释放,并伴有很大声响,而引起岩石爆裂松脱、剥离、弹射甚至抛掷性破坏的现象,由于工程区高地应力段分布广,岩爆现象发育。

撑靴破坏是TBM施工中特有的破坏形式,破坏位置主要是撑靴压覆的边墙,主要表现为撑靴卸荷之后围岩的垮塌破坏。

3 围岩变形破坏特征及其对比

在引水隧洞开挖过程中,课题组紧密配合施工进行快速地质编录,采用激光测量方法,对施工开挖后的二次破坏进行及时测量,测量隧洞超挖掉块形成的空腔尺寸大小,包括围岩洞壁的破坏长度、破坏深度和破坏面积等。

3.1 破坏长度对比

在工程地质条件相同的洞段,进行不同施工方

法下的破坏长度对比,图1为两种不同工法下破坏长度对比。



图1 各隧洞围岩破坏长度对比(单位:m)

Fig.1 Comparison of damage length of tunnel surrounding rock (Unit: m)

由图1可知:

① 对于结构面型破坏,TBM 开挖段相较于钻爆法开挖段的破坏长度较短。

② 对于岩爆、应力型破坏和结构面-应力型破坏,TBM 开挖段相较于钻爆法开挖段的破坏长度较长。

③ 破坏总长度方面,TBM 开挖段与钻爆法开挖段相比,破坏总长要大些。这一方面与施工工艺有关,由于TBM 开挖的洞室,断面光滑平整,即使局部较小的掉块也清晰明了,便于资料的收集;另一方面,TBM 引水隧洞中多了撑靴破坏。

④ 撑靴破坏是TBM 开挖特有的方式,通过现场跟踪调查,撑靴造成的破坏是因撑靴间断性、反复性地对围岩加压卸荷造成的。在TBM 施工初期,撑靴本身及施工工艺都存在缺陷,主要表现为撑靴与围岩的接触面积小造成围岩的应力水平较高,反复加压卸荷导致撑靴部位坍塌;此外,在隧洞掘进的过程中,撑靴与裸露的围岩直接接触,边墙没有任何喷锚支护及其它支护措施,这一定程度上加剧了围岩的破坏。通过对撑靴的改造,增大撑靴的面积和施工方法的改进(在边墙撑靴挤压之前进行喷锚支护),有效地抑制了撑靴位置的破坏。

3.2 破坏部位对比

为研究高地应力下隧洞支护部位重点,按照破坏部位进行对比,破坏部位分为南侧边墙、南侧拱肩、拱顶、北侧拱肩和北侧边墙五个部分,如图2~图4所示。

由图可见:TBM 开挖段的岩爆、应力型、结构面-应力型破坏大于钻爆法开挖段。

另外,这三种高地应力破坏亦有共同点:破坏多



图2 岩爆在不同部位的破坏长度

Fig.2 Lengths of damaged rock mass due to rock bursts in different parts



图3 应力型破坏在不同部位的破坏长度

Fig.3 Lengths of damaged rock mass due to stress-type failures in different parts

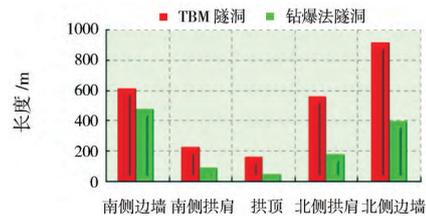


图4 结构面-应力型破坏在不同部位的破坏长度

Fig.4 Lengths of damaged rock mass due to structural plane-stress type failures in different parts

集中在北侧拱肩和北侧边墙,在拱顶发育略少,这一特征与区域应力分析也较为吻合。区域内最大主应力是沿南侧拱肩-北侧拱脚方向,因此在北侧拱肩-北侧边墙一带压应力高度集中,导致围岩产生压致-拉裂型破坏。在实际调查中南侧拱脚的围岩破坏对施工的影响弱于轴线以北的破坏,理论分析与宏观的统计基本吻合。

高地应力作为施工区典型的特征,其引起的破坏在施工中也应予以重视,北侧边墙和北侧拱肩应作为支护的重点,其支护强度略高于其它位置。

3.3 破坏深度对比

根据现场调查,破坏坑深按照0.5 m、1 m、3 m为界

限值进行划分,围岩破坏情况对比如图5~图8所示。

(1) 坑深 ≤ 0.5 m的围岩破坏对比

图5是围岩破坏坑深 ≤ 0.5 m的长度统计对比结果。由此可见,在坑深 ≤ 0.5 m的围岩中,TBM开挖引起围岩破坏的总长度比钻爆法开挖大,并且两种施工方法对围岩的破坏模式有差异性影响,TBM开挖的围岩表面光滑平整,在高地应力下,围岩破坏以应力型破坏、结构面-应力型破坏为主,而钻爆法开挖的洞室由于临空条件充分,围岩以结构面型破坏为主。



图5 围岩破坏坑深 ≤ 0.5 m的分布长度
Fig.5 Distribution lengths of damaged rock mass pits with depths of ≤ 0.5 m

(2) 坑深0.5~1 m围岩破坏对比

图6是围岩破坏坑深0.5~1 m的统计结果,由此可见,TBM开挖段的破坏长度明显比钻爆法洞段大。



图6 围岩破坏坑深0.5~1 m的分布长度
Fig.6 Distribution lengths of damaged rock mass pits with depths of 0.5~1 m

(3) 坑深1~3 m围岩破坏对比

图7是围岩破坏坑深1~3 m的长度统计图,由此可见,TBM破坏长度比钻爆法的略多,坑深1~3 m的累计长度约占开挖洞长的6.75%。

(4) 坑深 > 3 m的围岩破坏对比

图8是围岩破坏坑深 > 3 m的长度统计结果,由此可见,四条引水隧洞破坏坑深 > 3 m的总长度极少,仅占开挖洞长的0.8%。

综上所述,通过围岩破坏坑深对比可知:TBM



图7 围岩破坏坑深1~3 m的分布长度
Fig.7 Distribution lengths of damaged rock mass pits with depths of 1~3 m



图8 围岩破坏坑深 > 3 m的分布长度
Fig.8 Distribution lengths of damaged rock mass pits with depths of > 3 m

开挖段的二次破坏总长度比钻爆法开挖段二次破坏长度要大,但不同的破坏方式有所差异,具体表现为:根据施工开挖后的二次破坏编录,在锦屏高外水压力高地应力条件下,TBM开挖段的岩爆破坏、应力型破坏、结构面-应力型破坏大于钻爆法开挖段,钻爆法开挖段的结构面型破坏大于钻爆法开挖段。

3.4 围岩破坏面积对比

关于不同施工方法对围岩破坏面积的影响,对比结果如图9所示。



图9 各隧洞破坏面积
Fig.9 Damaged areas of the tunnels

由图9可知,TBM开挖段的二次破坏面积大于钻爆法开挖段。其原因于TBM施工后围岩面光滑平整,统计中包含部分小规模坍塌破坏,这种小规模

的破坏在钻爆法开挖段不易收集;此外TBM开挖段的破坏包含了撑靴破坏。从图中可知,去掉撑靴破坏之后,TBM开挖段的破坏面积仍然比钻爆法开挖段大。

对不同破坏坑深的破坏面积进行对比,如图10所示。

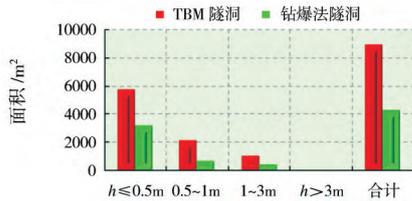


图10 隧洞不同坑深的破坏面积

Fig.10 Damaged areas of tunnels with different pit depths

从图10可以看出:

① 围岩破坏面积随着破坏坑深的增大而减小,由图可知,洞室围岩主要集中在坑深 $h \leq 0.5m$ 、 $0.5m < h \leq 1m$ 范围内发生破坏;

② TBM开挖段的二次破坏总面积大于钻爆法开挖段,即TBM开挖段的破坏规模较比钻爆法开挖段大,主要体现在TBM开挖段应力型、结构面-应力型造成的破坏规模大。

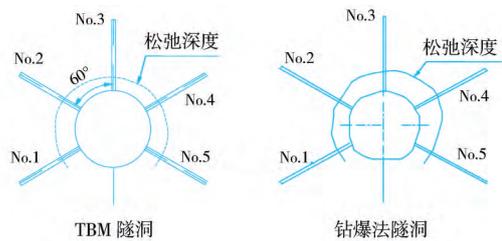
3.5 松弛深度对比

对于相同地质条件下的不同施工方法,测量得到的围岩松弛断面如图11所示。

由图可知,同一地质条件下,采用钻爆法开挖的隧洞,其围岩松弛深度较采用TBM开挖的隧洞更大,相差40~100cm。这一方面是由于爆破施工对围岩的扰动较TBM更大,在采用爆破法开挖的过程中,松弛圈内围岩的损伤程度较TBM开挖产生的损伤程度更大,围岩的质量有所下降;另一方面,采用TBM开挖的隧道围岩支护更加及时,限制了松弛圈向围岩深部的扩展,有利于围岩的整体稳定,而钻爆法开挖时采用的系统支护通常落后于掌子面,容易对围岩造成进一步破坏,甚至造成围岩累进性破坏。因此,采用钻爆法开挖的隧洞在加强支护的同时,其支护的强度也应该优于TBM开挖的隧洞,以限制围岩松弛深度的发展。

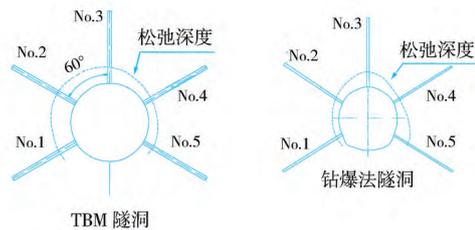
4 力学机制分析

工程区地处我国川西横断山脉,由于地壳长期的剧烈抬升,同时伴随雅砻江强烈下切作用,形成山



测试孔	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
TBM隧洞松弛深度/m	3.0	2.8	1.8	2.2	2.6
钻爆法隧洞松弛深度/m	2.8	2.8	3.6	4.2	3.0

(a) K15+700声波检测成果



测试孔	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
TBM隧洞松弛深度/m	2.6	2.8	2.2	1.2	1.4
钻爆隧洞松弛深度/m	1.2	1.6	2.8	1.4	3.2

(b) K15+150声波检测成果

图11 不同施工方法下围岩的松弛深度

Fig.11 Relaxation depths of tunnels with different construction methods

高谷深的地貌形态,在地貌上属于地形急剧变化地带,因此,储存于地壳深处的巨大能量,在地壳迅速抬升后,虽然经过剥蚀作用使得部分能量释放,但是残余的部分能量很难释放殆尽,因而本区为地应力相对集中地区,储存有大量弹性能,从隧洞施工过程中出现岩爆这一事实即可说明,

在探洞内不同洞深范围采用了多种测试手段进行地应力的量测。根据地应力测试结果,在隧洞线高程1600m处测得最大主应力值为70.1MPa,最小主应力值为30.1MPa。围岩二次应力场计算结果显示:全断面一次开挖后,在拱顶、底部水平应力分量 σ_r 较大,为54MPa;在两侧拱腰部位垂直应力分量 σ_z 较大,为120MPa。

工程区围岩主要为三叠系中、上统的大理岩、灰岩、结晶灰岩及砂岩、板岩。根据试验结果,围岩应

力远超过岩石强度(表1),故高地应力破坏迹象显著。

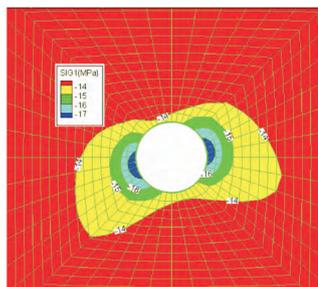
表1 隧洞区岩石物理力学参数(据长科院)

Table 1 Mechanical and physical parameters of tunnel rock masses (Based on the Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission)

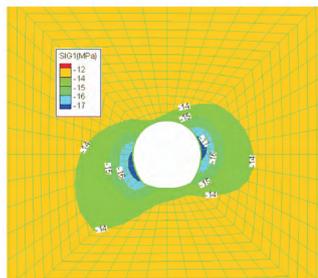
岩性	抗压强度/MPa	
	干	湿
中厚层中细粒砂岩(T ₃)	104~152	71~114
杂谷脑组大理岩(T _{2z})	70~90	55~78
中厚层大理岩(T _{2b})	90~100	75~85
条带状云母大理岩(T _{2y^a})	85~90	55~62
中厚层大理岩(T _{2y^b})	70~95	65~85
泥质灰岩(T _{2y^c})	70~75	60~70
互层状砂岩、板岩(T ₃)	70~95	42~53

注:表中数据依据现场原位实验获得。

另外,数值计算表明,不同的施工方法对最大主应力的变化影响很小(图12),在隧洞埋深和围岩分类相同的情况下,采用全断面开挖和分步开挖时,围岩的应力、位移和塑性区的分布规律都一样,即塑性



(a) TBM 开挖隧道后最大主应力分布



(b) 钻爆法开挖后隧道最大主应力分布

图12 不同施工方法下围岩主应力分布

Fig.12 Distribution of principal stresses for different construction methods

区和应力集中区主要分布在北侧拱肩和南侧拱脚,而位移主要分布在南侧拱肩和北侧拱脚。即便如此,应力集中的程度、位移和塑性区的分布范围还是有所差异,与采用钻爆法开挖的隧洞相比,采用TBM法开挖的隧洞,其围岩的应力集中程度更高,位移和塑性区的分布范围更广,而采用钻爆法开挖时,隧洞围岩的塑性区深度大于采用TBM法开挖隧洞的围岩塑性区,相差约50 cm左右。

从不同施工方法下围岩的破坏特征可知:采用TBM法开挖隧洞后二次破坏的范围比采用钻爆法开挖的范围要广,这是由于采用TBM法开挖时隧洞围岩应力集中程度较采用钻爆法开挖的要高。此外,采用TBM法开挖隧洞时围岩更容易发生岩爆、结构面-应力型、应力型破坏,破坏深度大多小于1 m,属于浅表层应力调整引起的破坏,但由于原岩质量较高,所以内部储存能量释放后围岩稳定性仍然较好;采用钻爆法开挖时,隧洞围岩卸荷松弛比较充分,应力集中程度不如TBM法高,因而应力破坏相对较少,但由于钻爆法损伤较严重,岩体完整程度、结构面性质等均较差,从而围岩自稳能力也随之降低。

结合围岩破裂迹象与破岩机理分析,可知当采用TBM开挖隧洞时,盘形滚刀破岩过程中对隧洞围岩的扰动较小,围岩应力-应变曲线的连续性和过渡性较好,因此TBM施工时对围岩影响较小,但围岩表面应力释放不充分,同时洞壁表面比较齐整,故TBM工法造成的浅表层破裂较为显著。而采用钻爆法开挖时,爆破动荷载作用下的初始地应力突然释放是一个与单纯地应力卸载不同的高速动态卸载过程,将导致围岩的超松弛,并且稳定性较差的块体在爆破过程中多已掉落,因此二次破坏范围较小,但该工法下导致围岩松弛深度更大。

图13为TBM和钻爆法施工的隧洞现场围岩质量统计图,从图中可见,两者差别不大,这说明对于

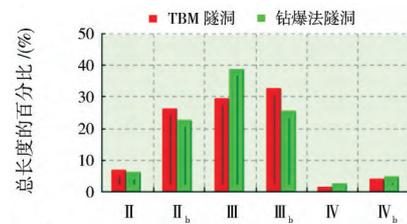


图13 不同施工条件下围岩的质量级别

Fig.13 Grading of surrounding rock for different construction conditions

深埋隧洞而言,TBM虽然开挖扰动较小,但地应力得不到充分释放,易于产生应力型破坏;钻爆法虽然扰动大,但由于围岩周边地应力得到一定释放,应力集中程度较低,岩体的应力型破坏反而减少了,但由于钻爆法施工条件下块体临空条件充分,结构面型破坏相对较多。

5 结论

通过大量地质资料的统计处理和力学分析,对TBM法、钻爆法两种不同施工方法下围岩的破坏特征取得如下认识:

(1) 根据岩体破坏机制,隧洞围岩破坏可分为结构面型破坏、应力型破坏、结构面-应力型破坏、岩爆、撑靴破坏等五种类型,其中撑靴破坏是TBM独有的破坏方式。

(2) TBM法与钻爆法对围岩影响的共性特征为:破坏部位相同、破坏坑深相近,破坏面积相近并集中在 $0.5\sim 3\text{ m}^2$ 。

(3) TBM法和钻爆法对围岩影响的差异性在于:TBM开挖段的二次破坏长度比钻爆法二次破坏长度大,这是由于TBM开挖时围岩的应力集中程度较高的原因。另外,采用TBM法施工时岩体易发生岩爆、结构面-应力型、应力型破坏。

(4) 与钻爆法开挖的隧洞相比,采用TBM法开挖的隧洞,其围岩的应力集中程度更高,位移和塑性区的分布范围更广,钻爆法围岩塑性区深度大于TBM围岩塑性区约 $40\sim 100\text{ cm}$ 。

(5) 上述成果以锦屏二级长引水隧洞为典型案例进行研究,在其它地质条件下的适用性有待进一步验证和发展。

参考文献

References

- [1] KELSALL P C, CASE J B, CHANANNES. Evaluation of Excavation-induced Changes in Rock Permeability[J]. Int.J. Rock Mech. Min. Sci.and Geomech. Abstr. 1984, (21): 123-135.
- [2] JI Feng, LU Junfu, SHI Yc. Mechanical Response of Surrounding Rock of Tunnels Constructed with the TBM and Drill-blasting Method[J]. Natural Hazards, 2013, 6 (2): 545-556.
- [3] JI Feng, LU Junfu, SHI Yc. Prediction Model of Rock Mass Quality Classification Based on TBM Boring Parameters[J]. Dister Advances, 2013, 6 (2): 265-274.
- [4] 梁治安. 岩体爆破影响区的声波测试[J]. 岩土力学, 1992, 13 (4): 73-79.
LIANG Zhian. Acoustic Detecting of Blast Affecting Areas in Rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13 (4): 73-79.
- [5] 尚彦军, 杨志法, 曾庆利, 等. TBM施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (12): 2404-2411.
SHANG Yanjun, YANG Zhifa, ZENHG Qingli, et al. Retrospective Analysis of TBM Accidents from Its Poor Flexibility to Complicated Geological Conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (12): 2404-2411.
- [6] 李亮, 傅鹤林. TBM破岩机理及刀圈改形技术研究[J]. 铁道学报, 2002, 22 (4): 8-10.
LI Liang, FU Helin. Rock Breaking Mechanism by TBM and Modification to Pan Knife Ring[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 22 (4): 8-10.
- [7] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. TBM和钻爆开挖条件下隧洞围岩损伤特性研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42 (11): 122-128.
YAN Peng, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Study of the Damage Characteristics of Surrounding Rocks for Tunnels Constructed using TBM and Drill-and-blast[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (11): 122-128.
- [8] 余成学, 卢薇, 黄祥志. 大断层区隧洞TBM施工超前注浆加固计算[J]. 武汉大学学报, 2005, 38 (3): 36-40.
SHE Chengxue, LU Wei, HUANG Xiangzhi. Pre-grouting Calculation of Tunnel in Big Fault Zone under TBM Excavation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38 (3): 36-40.
- [9] 程兵锐, 冯夏庭, 等. 在TBM开挖的深埋隧洞中岩石声发射测试的损伤演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (8): 1562-1569.
CHEN Bingrui, FENG Xiating, et al. Acoustic Emission Test on Damage Evolution of Surrounding Rock in Deep-buried Tunnel during TBM Excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (8): 1562-1569.

- [10] 李育枢, 李天斌, 郑建国. 西南某电站辅助隧洞岩爆地质力学模式研究[J]. 现代隧道技术, 2006, 42 (1): 41-46.
LI Yushu, LI Tianbin, ZHENG Jianguo. Study on the Geomechanical Patterns of Rockburst Access Tunnel of a Hydroelectric Power Station in Southwest China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 42 (1): 41-46.
- [11] BILGIN N, DEMIRCI M A, COPUR H, et al. Dominant Rock Properties Affecting the Performance of Conical Picks and the Comparison of Some Experimental and Theoretical Results[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43 (1): 139-156.
- [12] ACAROGLU O, OZDEMIR L, ASBURY B. A Fuzzy Logic Model to Predict Specific Energy Requirement for TBM Performance Prediction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23 (5): 600-608.
- [13] FUKUI K, OKUBO S. Rock-properties Estimation by TBM Cutting Force[C]//9th International Congress on Rock Mechanics, PARIS, FRANCE, 1999.
- [14] EBRAHIM F, JAMAL R. Correlation of Tunnel Convergence with TBM Operational Parameters and Chip Size in the Ghomroud Tunnel, Iran[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23 (6): 700-710.
- [15] KHADEMI H J, KOUROSH S, BAHRAM R, et al. Performance Prediction of Hard Rock TBM Using Rock Mass Rating (RMR) System[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25 (4): 333-345.

Failure Characteristics and Mechanical Mechanism of Deeply-Buried Tunnels with High External Water Pressure for Drill & Blast and TBM Methods

JI Feng¹ ZHANG Qianqi¹ LI Hongming¹ ZHOU Chunhong² GAO Jishun¹

(1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;
2 Huadong Engineering Corporation Limited, PowerChina, Hangzhou 310014)

Abstract Drill&blast and TBMs are two main methods for excavating underground works, and both have a significant impacts on the disturbance degree and reinforcement measures of surrounding rock. Based on four large parallel tunnels adopting the TBM and drill&blast methods, the influence of the excavation method on surrounding rock damage is studied. Through statistical processing of geological data and mechanical analysis, the failure modes of the tunnel's surrounding rock are summarized and common features of the effects of the two construction methods on the surrounding rock are concluded. In addition, a comparison of the effects of the two construction methods on the surrounding rock are conducted, and it is determined that the secondary failure range by TBM is larger than that of the drill & blast method and a TBM is inclined to produce rock bursts and stress failure, while structural plane failure is more likely to occur when the drill& blast method is adopted. Furthermore, mechanical mechanisms of various failures are analyzed based on the above.

Keywords Tunnel; Drill&blast method; TBM method; Failure mode; Mechanical mechanism