

TBM 在不良地质洞条件下的施工技术

刘大军, 张益忠

(中国地质工程集团公司, 北京 100190)

摘要: TBM 掘进机以其快速、高效、安全、优质等优点越来越广泛地被应用于隧洞开挖施工中, 尤其更适用于深埋超长隧洞, 然而在不良地质洞段中 TBM 掘进缓慢, 甚至有卡刀可能, 反而不如钻爆法灵活, 这就需要根据围岩性状采取特殊技术处理措施, 辅以监控量测手段对支护方案进行验证、调整支护措施、修正设计参数等。结合辽宁大伙房输水隧洞工程, 总结了在不良地质洞条件下的超前地质预报方法、不良地质段处理措施以及围岩变形监测方法。

关键词: 超长隧洞; 不良地质; TBM 法; 超前地质预报; 变形监测

中图分类号: TV554 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2008)10-0060-06

Construction Technology of TBM in Unfavorable Geological Tunnel Section/LIU Da-jun, ZHANG Yi-zhong (China Geo-engineering Corporation, Beijing 100190, China)

Abstract: TBM boring machine is widely applied in tunneling excavation with its high speed, high efficiency, high safety and good quality, it is especially suitable for deep-lying long tunnel, but drives slowly in unfavorable geological tunneling section. In this case, special technical methods should be taken according to the surrounding rock characters, verification should be done to verify supporting method and design parameters. Summary was made in geological forecast method, treatment measures and deformation monitoring method in unfavorable geological tunneling condition with field case.

Key words: ultra long tunnel; unfavorable geology; TBM method; geological forecast; deformation monitoring

1 工程概况

辽宁省大伙房水库输水工程主体建筑物为超长输水隧洞, 隧洞全长 85.32 km、开挖直径为 8.0 m。TBM1 标段位于桓仁和新宾两县交界处的双山头~疙疸寨地段, 主洞起点桩号 21+610.82 m, 终点桩号 44+288.00 m, 总长度 22.677 km, 其中 TBM 法施工的主洞段桩号 23+513.678~44+288.0 m, 掘进长度 20.774 km, 常规钻爆法施工的主洞段桩号 21+610.82~23+513.678 m, 开挖长度 1.903 km。TBM1 是本工程 3 个 TBM 标段中最长的一个标段, 也是目前世界上采用 TBM 独头掘进的最长距离。

2 工程地质

2.1 不良地质段地质情况

辽宁大伙房输水隧洞工程 TBM1-1 段位于辽东地区本溪市桓仁县双山头与西岔之间, 穿越桩号为 23+786.678~34+228.7 m, 全长 10442.022 m, 该段主要出露岩石为正长斑岩、混合花岗岩及混合岩, 局部出露少量的煌斑岩及闪长岩等, 分别位于桩号 23+786.678~30+045 m、30+045~32+845 m 及 32+845~34+228.7 m 段, 长度分别为 6258.322、2800 及 1387.7 m, 岩石饱和抗压强度分

别大约为 54、56 及 60 MPa, 其间发育规模较大的断层有 F20、F20-1、KF3 及 F27, 洞室平均埋深为 180~550 m, 岩石多微风化~新鲜, 受构造作用影响较小, 因此岩体大部分较完整。由于本段山高坡陡, 有利于地下水的径流与排泄, 而不利于降水的渗入与储存, 因此大部分洞段地下水呈干燥状态。

在实际开挖过程中, 桩号 26+960~27+691 m、31+735~750 m 及 32+280~338 m 段出现了不良地质洞段, 总长 804 m, 不良地质段洞室埋深为 215~265 m, 具体地质情况分析如下。

26+960~27+691 m 段围岩主要为正长斑岩、煌斑岩及构造岩, 肉红色~黑色, 围岩节理裂隙发育, 多为节理密集带, 微张~张开, 充填泥质。该段共发育了 30 多条规模大小不一的断层, 其中包括 4 条规模较大的断层和同步发育的部分小断层, 断层多呈 NE 向展布, 倾向 SE, 倾角 22°~55°。该段地下水呈干燥状态, 地下水对洞室的稳定性没有影响。由于部分断层规模较大且与洞轴线交角较小沿洞线方向延伸较远, 对洞室稳定性影响的距离较大, 非常不利于洞室的稳定, 该段除受断层的影响外, 部分洞段还出露有煌斑岩脉, 由于煌斑岩质脆, 且隐裂隙十分发育, 在煌斑岩与正长斑岩侵入接触的部分洞段

收稿日期: 2008-09-22

作者简介: 刘大军(1971-), 男(满族), 辽宁人, 中国地质工程集团公司高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事地下工程隧道 TBM 施工工作, 北京市海淀区知春路丙 18 号, liuda1621@163.com。

岩体较破碎,煌斑岩的出露对洞室稳定也有一定的影响。该段岩石饱和抗压强度多数在 30 MPa 左右,岩石为较软~中硬岩,局部充填泥质较高的岩石饱和抗压强度 < 15 MPa。该段主要发育的 MDf10-58, MDf10-59, MDf10-60、MDf10-60-1 四条断层,宽度在 0.2~2.8 m 之间。由于受大规模发育断层及煌斑岩的侵入接触破碎带的影响,岩体较破碎,加之岩石强度较低,围岩稳定性差,开挖过程中出现大面积的塌方(见图 1)。



图 1 不良地质洞段围岩塌方情况

31+735~750 m 段围岩大部分为混合花岗岩及少量闪长岩,中硬,局部岩石强度较低,岩体新鲜~微风化,岩体较破碎。围岩节理裂隙发育,多呈微张~张开状,充填岩屑或泥质,节理面起伏光滑~平直光滑,围岩多为节理密集带,该段闪长岩呈岩脉或岩枝穿插分布于混合花岗岩中,形成侵入接触破碎带。该段发育一断层 MDf10-71,断层发育产状为 NW330°∠SW45°断层宽 0.5~0.8 m,断层由断层泥及构造岩构成,断层泥宽 0.8~4.0 cm,断层上盘起伏光滑,由于受断层及接触破碎带的影响,开挖过程中 31+735~750 m 段右壁及顶拱产生较大面积的塌方,围岩不稳定,不加强支护处理有可能产生更大规模的变形破坏。

32+280~338 m 段围岩为混合花岗岩,中硬~较软,岩体较破碎,围岩整体强度较低,节理裂隙发育,微张~张开,多呈张开状,充填岩屑或泥质,多处为节理密集带。自桩号 32+280 m 开始发育断层 MDf10-74,走向 NW280°~290°,倾角 < 15°,呈压性,断层内充填构造岩和断层泥,断层泥宽 0.1~0.3 cm,走向与洞轴线交角较小,倾角较缓,断层上、下盘面起伏粗糙,对洞室稳定不利;该断层向前延伸相交于桩号 32+293 m 处发育的断层 MDf10-76 上;MDf10-76 产状为 NW340°~350°∠45°~60°,断层构成物质主要为断层角砾岩、构造片岩及断层泥,断层交汇段岩体较破碎,产生大规模塌方,塌腔

最深处约为 2 m,32+282.5~285 m 处顶拱滴水,32+290 m 处左拱肩有多处滴水,地下水对围岩稳定影响较大。

2.2 不良地质段超前地质预报情况

为了预测前方围岩情况,在施工过程中在桩号 27+010 m 及 32+312 m 分别采取了 TSP 及 HSP 超前地质预报措施。

2.2.1 TSP 隧道地震波超前地质预报

TSP 隧道地震波超前地质预报系统是利用地震波在不均匀地质体中产生的反射特性,预报隧道掘进面前方及周围临近区域地质体的,它是在掌子面后方边墙上一定范围内布置一排爆破点,依次进行微弱爆破,产生地震波信号在隧道周围岩体内传播,当岩石强度发生变化时,信号的一部分被返回,界面两侧的岩石强度差别越大,反射回来的信号就越强,返回的信号被经过特殊设计的传感器转化成电信号并进行放大,根据信号返回的时间和方向,通过专用数据软件处理,可以得到岩体强度变化界面的位置,其原理如图 2 所示。

考虑到试验精度等的影响,本次 TSP 解释范围为掌子面前方 125 m,试验结果为:(1)掌子面前方 0~44 m,岩体较破碎,为软弱破碎带,局部发育小断层,对应里程范围 27+010~054 m;(2)掌子面前方 44~88 m,岩体较破碎,为软弱破碎带,对应里程范围 27+054~098 m;(3)掌子面前方 88~125 m,为断层破碎带,发育规模相对较大的断层,岩体较破碎,围岩地下水发育,对应里程范围 27+098~135 m。

实际过程中掌子面前方出露围岩较破碎,前方发育几条规模相对较小的断层,在 27+085.0~118.0 m 段发育一规模相对较大的断层,对围岩的稳定性影响较大。该段地下水呈干燥状态,地下水对围岩的稳定性没有影响。

2.2.2 HSP 声波反射法探测

HSP 声波反射法探测和地震波探测原理相同,其原理是建立在弹性波理论的基础上,传播过程遵循惠更斯—菲涅尔原理和费马原理。采用声波法探测不良地质(带)的物理前提是:声波在岩土体中的传播速度及幅度等参数和岩土体的组成成分、密度、弹性模量及岩体的结构状态等有关,不良地质体(带)如断层、风化破碎带、岩溶洞穴、地下水富集带等与周边地质体存在明显的声学特性差异。

当声波传播路径中存在两种不同固体介质的界面时,波的传播将发生折射、反射和波型转换。纵波

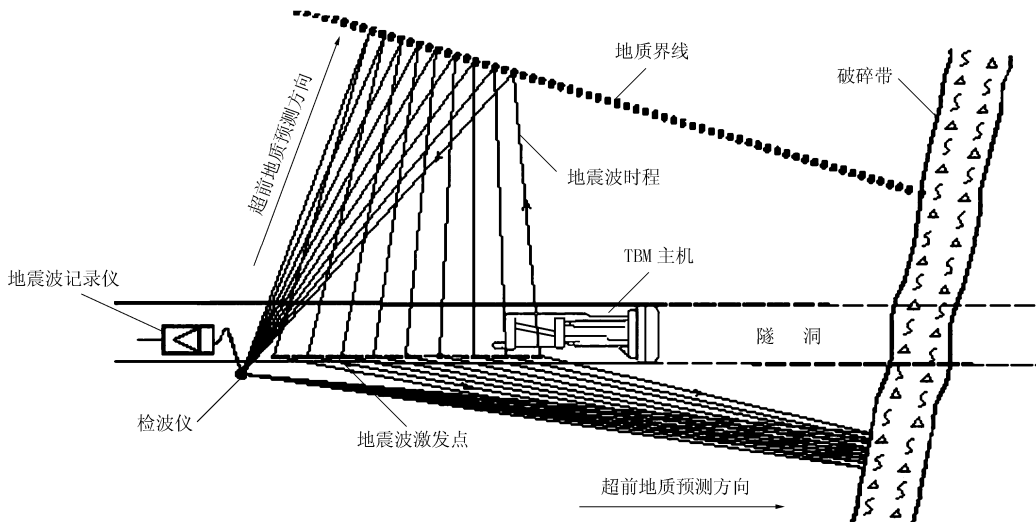


图2 TSP 预报系统超前预报原理图

入射时在界面上将产生4种波:2个反射波(纵波和横波)和2个折射波(纵波和横波),其传播符合斯奈尔定律。在正交入射情况下,不会发生传输模式的转换,其声压和声强的透射系数和反射系数取决于两种介质的特性阻抗比值。当声波由完整岩体传播至碎裂岩或土组成的破碎带时,就是声波从高阻抗介质到低阻抗介质的典型情况。因此,通过探测反射波信号,便可了解前方岩体的变化情况。

本次HSP测试岩体声波平均纵波速度为3315 m/s。通过对现场采集原始波形曲线进行时域和频域分析,初步分析认为,目前掌子面前方90 m范围内(32+312~402 m)主要为较破碎~较完整混合岩,其中:

(1)测试点(非刀盘前方工作面)前方0~26 m,转换为刀盘前方工作面前方0~16 m岩体破碎(因测试点距离刀盘前方工作面10 m,故减去10 m),岩体完整性逐渐变好,对应里程范围32+302~328 m,建议围岩类别为V类;

(2)测试点前方40~49 m,转换为刀盘前方工作面前方30~39 m(同上)为岩体破碎带,对应里程范围32+342~351 m,建议围岩类别为IV类;

(3)测试点前方59~66 m,转换为刀盘前方工作面前方49~56 m(同上)为岩体破碎带,对应里程范围32+361~368 m,建议围岩类别为IV类;

(4)测试点前方75~82 m,转换为刀盘前方工作面前方65~72 m(同上)为岩体破碎带,对应里程范围32+377~384 m,建议围岩类别为IV类;

(5)其余未明确指出地段,岩体相对较完整,建议围岩类别III类。

实际施工出露围岩为:32+302~321 m段围岩

为V类;32+321~338 m段围岩为IV类;32+338 m开始向下游方向围岩变好,围岩变为IIIb类。

2.2.3 预报结果及评价

综上所述,由于不良地质段整体埋深相对较浅,多数埋深在250 m左右,洞轴线很接近上层第四系覆盖层,同时由于围岩节理裂隙发育且充填泥质,受泥质软化影响,岩石强度较低,加之大规模缓倾角断层的影响,形成断层破碎带,由于不良地质段受岩脉和岩枝穿插侵入接触的影响,局部形成侵入接触破碎带,受断层、节理裂隙及侵入接触破碎带的影响,开挖过程中不良地质段岩体较破碎,导致围岩不稳定,只有通过加强支护处理措施,才能满足洞室稳定性的要求。

TSP超前地质预报测试结果内容较为详细,但前期准备工作相对较为复杂,对地质条件的判定基本可靠,由于其对围岩类别的判定范围较大,有效范围为掌子面前方100~350 m,本次测试考虑到精度的影响,预测范围为掌子面前方125 m,实际围岩类别也均在其预报范围之内,但该方法对地下水状态的判定有一定偏差。

HSP超前地质预报能够较可靠地预测出掌子面前方50 m洞段的地质情况,区别破碎带与非破碎带较为可靠,但对判定是断层破碎带还是岩体破碎带可靠性较差,且该方法无法预测地下水状态。

3 不良地质段处理措施

根据不良地质变形现场情况,我们采用了“两封一灌”的加固方案:

(1)底板钢拱架采用I10工字钢和Ø25 mm锁脚锚杆连接,使钢拱架形成一个封闭的骨架;

(2)底板浇注 C25 混凝土和边顶拱喷射混凝土连接,形成一个封闭薄壳结构;

(3)顶拱 120° 范围内设置系统锚杆,把钢拱架、喷射混凝土与围岩连成一个受力体;

(4)采用固结灌浆使隧洞的松动圈形成一个胶结的、封闭的整体。

3.1 钢拱架的加固措施

由于边顶拱围岩的下沉,底板钢拱架发生弯曲变形,为了增强钢拱架的刚度和整体稳定性,在相邻钢拱架之间增设 I100 工字钢作为纵向连接筋和斜向连拉筋,纵向连接筋间距为 1000 mm,斜向连拉筋间距为 790 mm。施工中,根据钢拱架变形程度,增设 $\varnothing 25$ mm、 $L=4000$ mm 锁脚锚杆。见图 3。



图 3 钢拱架的加固施工图

3.2 底板混凝土浇注措施

由于 TBM 喷射手喷射角度限制,底板 40° 范围内为喷射混凝土盲区。施工中,底板浇注 C25 混凝土和喷射混凝土连接,形成一个封闭结构,加强隧洞整体的稳定。考虑施工期间运输轨道铺设、固结灌浆所需压板、混凝土的永久衬砌方式,底板混凝土的浇注设计范围为底拱 60°,底拱 30° 范围内为一个混凝土平台,混凝土最大厚度为 30 cm,两边混凝土厚度为 18 cm,详细设计参数见图 4。

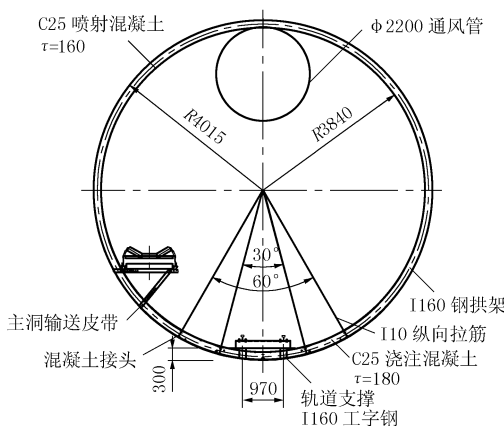


图 4 底板混凝土浇注施工图

3.3 隧洞固结灌浆施工

采用边顶拱喷射混凝土和底板浇注混凝土作为不良地质洞段固结灌浆压板,先固结底拱,再固结边顶拱。

在拱腰及其以上部位灌浆孔呈环形布置,造孔、灌浆分两序进行,每环 12 个孔,其中 I 序孔 8 个,II 序孔 4 个,考虑到风管及钢拱架及其连接筋的影响,环间距为 1288 mm,灌浆孔环向间距设置为 1437 mm,圆心角为 20.5°,同时,在风管位置增设 2 个 I 序孔,环向间距为 737 mm。底拱布置 7 个灌浆孔,其中 I 序孔 3 个,II 序孔 4 个,考虑钢拱架及其连接筋的影响,环间距为 1288 mm,环向间距 1261 mm,圆心角为 18°。详细设计参数见图 5。

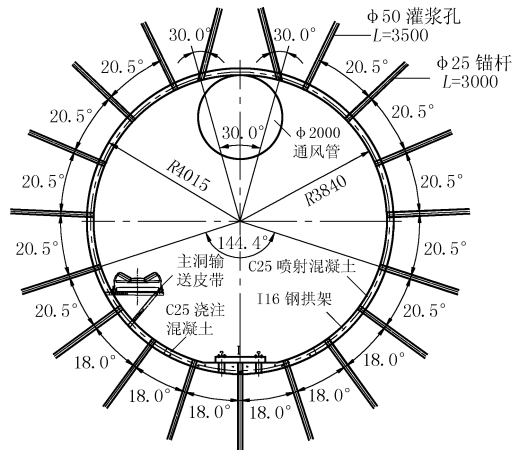


图 5 固结灌浆孔横断面布置图

3.4 顶拱锚杆支护

不良地质洞段顶拱 120° 范围内实施系统锚杆施工, $\varnothing 25$ mm 锚杆, $L=4.0$ m,间距 1.0 m \times 1.0 m。通过系统锚杆把钢拱架、喷射混凝土与围岩连成一个受力体。顶拱锚杆布置见图 6。

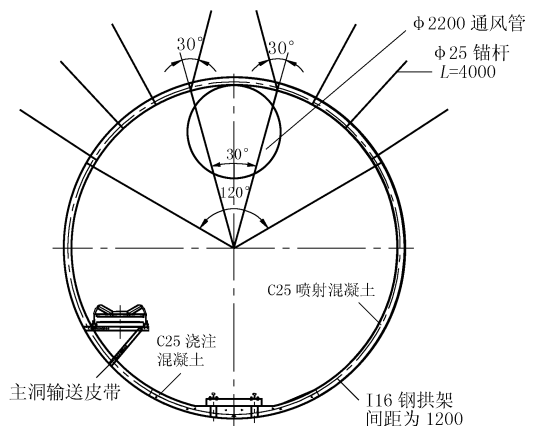


图 6 顶拱锚杆布置横断面图

4 围岩变形监测与结果分析

4.1 监测断面布置形式和监测数据统计

对该段进行初期支护后,及时地对不良地质段进行了隧洞围岩的收敛变形监控量测,由于该段围岩破碎,监测断面布置较密,每隔 12 m 左右布置一个监测断面,共计布置了 34 个监测断面,本工程采用 JSS30A 型系列数显收敛计,其适应环境温度为 $0 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\geq 93 \pm 3\%$,基本参数为:测量范围 $0.5 \sim 20\text{ m}$ 、分辨率为 0.01 mm ,测量精度为 0.06 mm ,数显值稳定度 24 h 内不大于 0.01 mm 、电源使用 1.55 V 氧化银电池(SR44W)1 节,质量 0.9 kg ,断面测线布置形式如图 7。

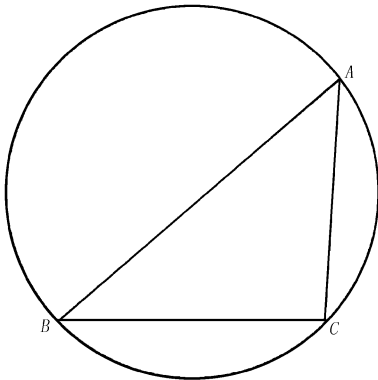


图 7 不良地质洞段收敛观测断面布置图

2006 年 6 月对 $26+960 \sim 27+691\text{ m}$ 之间的 34 个监测断面开始进行监测,监测 3 个月后,各个断面的监测结果显示(见表 1),监测断面变形基本趋于稳定,其中最大变形发生在围岩最破碎地段,最大变形为 75.32 mm 。

4.2 监测结果分析

从表 1 数据可以看出:监测断面除 LS2 ~ LS13 的变形较大外,其他断面变形均较小,且短期内趋于收敛,根据量测的原始数据绘制围岩变形与时间的特征曲线见图 8、图 9。

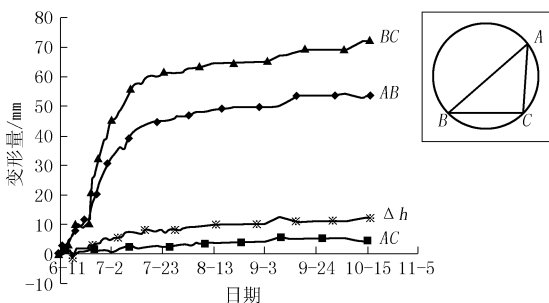


图 8 监测断面 6 围岩收敛变形时态曲线

在变形较大的 12 个断面中,3 条侧线的变形大小顺序基本上是 $BC > AB > AC$,也就是说水平收敛

表 1 围岩变形监测成果表

断面编号	断面桩号 / (km+m)	变形量/mm			变形速率/(mm·d ⁻¹)		
		AB	AC	BC	AB	AC	BC
LS-1	27+675	2.48	0.90	1.17	0.01	0.00	0.02
LS-2	27+653	8.45	0.74	9.02	-0.16	0.15	-0.18
LS-3	27+625	15.19	1.43	18.49	0.13	-0.04	0.26
LS-4	27+599	15.91	4.36	23.48	-0.04	0.01	-0.03
LS-5	27+583	39.40	3.67	43.04	0.01	0.18	-1.23
LS-6	27+572	53.61	4.63	72.23	0.06	0.02	-0.02
LS-7	27+560	47.66	3.90	75.32	0.00	0.05	0.02
LS-8	27+548	52.68	-1.80	70.23	0.05	0.01	0.02
LS-9	27+536	17.16	0.71	18.66	0.07	0.05	0.02
LS-10	27+524	22.89	1.40	36.62	0.18	0.08	0.30
LS-11	27+512	24.22	10.87	26.16	0.13	0.03	0.14
LS-12	27+500	16.53	5.75	15.57	-0.04	-0.10	-0.11
LS-13	27+485	13.97	0.40	12.31	-0.04	0.12	-0.01
LS-14	27+462	19.05	14.14	0.02	0.06	-0.12	-0.03
LS-15	27+435	0.63	0.42	2.02	0.01	-0.01	0.01
LS-16	27+415	0.78	0.20	0.66	0.01	0.01	0.00
LS-17	27+392	0.83	-0.46	0.60	0.00	0.01	0.00
LS-18	27+370	0.93	0.83	0.78	0.01	0.01	0.05
LS-19	27+350	0.86	0.18	0.14	0.01	0.01	0.02
LS-20	27+325	0.00	1.60	0.29	0.00	0.01	0.00
LS-21	27+302	0.35	0.24	1.97	0.01	0.00	0.02
LS-22	27+282	-0.34	-0.04	1.00	0.01	0.02	0.02
LS-23	27+263	0.91	-0.78	0.79	0.01	0.01	0.01
LS-24	27+235	0.55	-0.74	1.27	0.00	0.01	0.00
LS-25	27+212	1.73	-1.17	1.03	0.00	0.03	0.01
LS-26	27+194	1.21	0.99	0.40	0.01	0.02	0.02
LS-27	27+171	2.20	0.87	1.33	0.00	0.00	0.00
LS-28	27+153	1.34	-0.83	2.33	0.00	0.03	0.01
LS-29	27+135	0.12	-1.16	2.99	0.00	0.00	0.00
LS-30	27+113	0.17	-1.72	-0.05	0.00	0.01	0.00
LS-31	27+086	-0.35	-0.75	1.47	0.01	0.01	0.01
LS-32	27+064	-0.10	-1.35	0.82	0.01	0.00	0.01
LS-33	27+045	1.39	0.03	2.00	0.00	0.00	-0.11
LS-34	27+023	0.37	-0.37	1.73	0.01	0.03	0.03

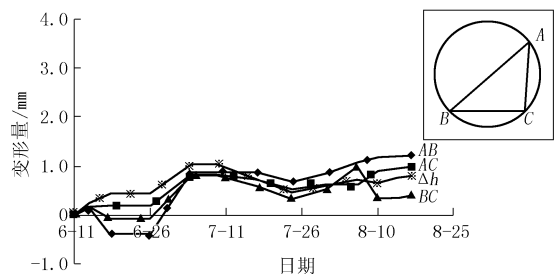


图 9 监测断面 26 围岩收敛变形时态曲线

位移最大,出现上述情况的原因可以与地质情况结合分析,在变形较大的 12 个断面中,在其右侧边顶拱部位存在一条断层,其中节理发育严重,TBM 刀盘经过后围岩出现塌方,指形护盾后能看到掉落的岩石。实施初期支护后,钢拱架和喷射混凝土受到松散压力和形变压力的影响,在圆形开挖断面中,水平直径处的围岩表面切向应力最大,容易在洞室两

侧形成具有向洞内移动倾向的楔形切体,加之围岩破碎严重,剪切楔形体向洞室位移的过程中对喷层产生变形压力,容易在拱脚和侧顶拱处产生剪切破坏,因此水平方向的侧线向洞内变形最大^[1],这和现场发生的侧顶拱处的喷射混凝土掉块和拱脚处钢拱架严重扭曲、锁脚锚筋变形是相吻合的,断层带围岩破碎形成的松散压力和喷射混凝土与围岩共同变形的形变压力是引起隧洞向内变形的根本原因。

根据规范要求,监测数据可采用指数函数公式和线性公式进行回归分析,对于短期内位移趋于收敛的可采用线性回归,因为实际采集的数据中存在着数据在某个范围内上下波动的情况。对于收敛期较长的曲线采用指数函数回归,指数函数中有多个公式,一般常用的有 $u = Ae^{-B/t}$ 和 $u = A(1 - e^{-Bt})$,本文采用第二个公式利用 ORIGIN 数值回归分析软件进行回归,回归结果见图 10、图 11。

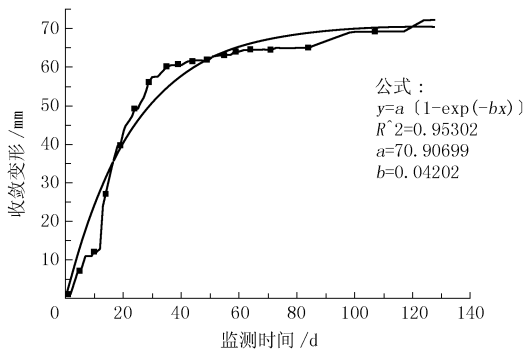


图 10 时间与变形回归结果图

从图 10、图 11 可以看出,对于变形较大的几个断面,其变形已经趋于稳定,回归曲线和收敛变形曲线,回归相关系数在 90% 以上。在回归公式 $u = Ae^{-B/t}$ 中, A 表示围岩最终位移量, B 表示变形曲线趋于收敛的接近程度。 B 越大表示其越接近收敛。

(上接第 72 页)

5.2 建议

K2 灰岩含水层岩溶裂隙发育不均,连通性较差,且本次为长距离注浆,注浆结束后,巷道残余水量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,若在注浆孔布置方面增加注浆孔数量,将能更好的提高在含水层裂隙发育不均情况下的注浆效果。

6 结语

干河煤矿清理斜巷掘进 K2 灰岩高压含水层预注浆施工的圆满完成,成功封堵了该高压含水层的

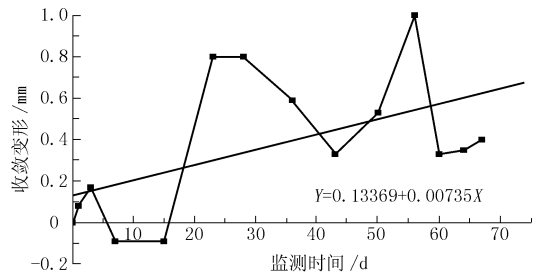


图 11 时间与变形回归结果图

5 结论

通过在实际工程中的摸索和借鉴其它类似工程的施工经验,总结出对大伙房隧洞中不良地质段处理的一些成功的施工措施,对本标段后期的施工和其它类似工程提供了一定的施工经验。

(1) 做好地质超前预报,提前对不良地质段进行处理,保证 TBM 顺利掘进。

(2) 开挖后及时施作初期支护,支立钢拱架,必要时可以加密,相邻钢拱架之间设置连接筋,及时封闭仰拱,防止拱脚处鼓起。

(3) 对不良地质段 TBM 开挖后,由于围岩破碎,指形护盾附近大面积塌方,不能采取及时的监控量测,待 TBM 设备通过后应加强对初期支护的变形量测,通过量测数据分析及时的采取相应的加强支护措施,保证隧洞的安全。

参考文献:

[1] 王建宇. 隧道工程的技术进步[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004.
 [2] 康世荣,陈东山. 水利水电工程施工组织设计手册(第 1~4 卷). 北京:中国水利水电出版社,1997.
 [3] SL/T 191-96, 水工混凝土结构设计规范[S].
 [4] SL 279-2002, 水工隧洞设计规范[S].

来水通道,解决了掘进施工中存在的重大突水危险。本次预注浆工艺简捷方便,技术可行,经济合理,安全可靠,值得在相似地层的井矿掘进中借鉴。

参考文献:

[1] 李勋千. 井筒涌水预测及注浆堵水技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992.
 [2] 戴国权. 动力巷道内堵水技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1987.
 [3] 程晓,张凤祥. 土建注浆施工与效果检测[M]. 上海:同济大学出版社,1998.
 [4] 张生华,李国富. 围岩注浆封堵井巷突水控制技术研究[J]. 中州煤炭,2003,(2).