

文章编号: 1006- 2106(2011) 01- 0039- 08

特长隧洞 TBM 施工与锚喷支护应用研究^{*}

张军伟^{1*} 梅志荣² 唐 与³

(1 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2 中铁西南科学研究院有限公司, 成都 610031;
3 辽宁润中供水有限责任公司, 沈阳 110000)

摘要: 研究目的: 通过对特长隧洞衬砌结构的选择、支护参数设计、不良地质段支护技术等方面的研究, 为特长隧洞的优化设计和 TBM 的结构安全和快速施工提供技术支持, 工程经验可供今后类似工程参考。

研究结论: 大伙房输水工程特长隧洞根据围岩条件选择了开敞式 TBM + 锚喷支护复合衬砌施工方案, 并且获得成功。实现的采用锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌替代管片衬砌既符合现代支护系统的 NATM 设计理念, 解决了 TBM 施工的止水与排水难题, 又节约了大量土地和大量资金。

关键词: 水利工程; 隧洞工程; 隧洞; TBM; 支护设计; 锚喷支护; 衬砌

中图分类号: TU454 **文献标识码:** A

Study on TBM Construction and Application of Bolt- shotcrete Support in Construction of Long Water Transfer Tunnel

ZHANG Jun-wei¹, MEI Zhi- rong², TANG Yu³

(1 China Academy of Railway Sciences Beijing 100081, China 2 Southwest Research Institute Co. Ltd of CREC, Chengdu, Sichuan 610031, China 3 Liaoning Runzhong Water Supply Co. Ltd Shenyang Liaoning 110000, China)

Abstract Research purposes The study was done on the selection of lining structure type, support design and support technology for long water transfer tunnel in the area with unfavorable geological conditions for making an optimal design and fast construction of the tunnel with TBM and providing the reference to the similar works.

Research conclusions The construction program of open- type TBM + the composite lining (bolt- shotcrete support + final lining) was used successfully for construction of Dahufang water transfer tunnel according to the wall rock condition. Application of the completed composite structure of bolt- shotcrete + final lining to replace segment lining not only agreed with the design idea of NATM (New Australian Tunneling Method), but also solved the problems in sealing water and draining water and saved a lot of lands and investments.

Key words hydraulic engineering; tunnel engineering; tunnel; TBM; support design; shotcrete support; lining

1 工程概况

大伙房输水工程特长隧洞长 85.32 km, 开挖洞径 8.03 m, 隧洞地处低山丘陵区, 最大和最小埋深分别为 600 m 和 60 m。主洞进水口端前 24.58 km 为钻爆

法施工标段, 出水口端后 60.84 km 为 TBM 施工标段 (主要由 TBM1、TBM2、TBM3 标段组成)。隧洞自进口始依次主要穿越中生代白垩系梨树沟组、早元古代混合花岗岩组、上元古界青白口系永宁组、下元古界大石桥组与盖县组、中生代燕山晚期侵入岩组五大岩组。

^{*} 收稿日期: 2010- 08- 02

基金项目: 辽宁水利厅科技开发项目 (Y181KJ017)

^{**} 作者简介: 张军伟, 1980 年出生, 男, 在读博士研究生。

其中,梨树沟组岩性主要为火山角砾岩与凝灰岩,火山角砾岩单轴抗压强度平均约 60 MPa,凝灰岩平均约 30 MPa;永宁组岩性主要为硅质石英砂岩,石英含量均在 70% 以上,铁质石英砂岩单轴抗压强度平均约 90 MPa,硅质石英砂岩平均约 120 MPa 为隧洞强度最高岩石;大石桥组与盖县组岩性主要为大理岩组合,属可溶岩,其单轴抗压强度平均约 55 MPa,燕山晚期侵入岩主要为正长斑岩,其单轴抗压强度平均约 54 MPa。根据实际开挖后地质条件,大部分围岩主要以 II 类为主,围岩自稳承受能力强,成洞条件较好,较适合 TBM 施工。隧洞所穿越的 29 条断层中除 5 条断层 (F3、F11、F13、F14、F41) 对围岩稳定影响较大之外,还有围岩大变形、岩溶及岩爆等不良地质对围岩稳定影响也比较大。同新奥法 (NATM) 一样,目前采用 TBM 施工时,隧洞围岩类别主要由现场采集到的围岩弹性波速度、岩类、地质时代等因素而确定,相应围岩类别的支护设计基本采用经验类比方法。支护手段多采用喷混凝土、锚杆、钢支撑以及木背板、钢背板等,软岩条件下采用预制管片,无论采取何种支护结构都是根据工程地质进行信息化(动态)设计的,但其设计方法在处理不良地质问题时还没有完全解决,主要问题如下^[1-8]:

第一,掌子面被 TBM 机体所堵塞,很难对掌子面前方地质状况直接进行观察判断;

第二,拱顶下沉和洞室周边收敛变形等监测项目在 TBM 开挖后立即进行比较困难,需要采用量测以外手段来判断围岩的稳定性和支护的合理性;

第三,支护位置要距离掌子面一定距离,设置时间较迟,不能及时跟进;

第四,支护方式和设置时间因 TBM 形式而定;

第五,TBM 直径多种多样,相同条件下的工程实践经验较少,采用 TBM 施工的支护要在实践经验的基础上逐步完善。

另外,目前限于国内施工技术水平,隧洞穿越不良地质尤其是岩溶地质时,若采用管片衬砌结构,即使设定多道止水防线,终因管片接头施工工艺复杂,漏水问题仍无法解决,故在不良地质中隧洞管片接头漏水成为采用管片衬砌结构的制约因素,除此之外,TBM 施工中管片安装对精度控制较为严格,也增加了施工难度等等。为解决 TBM 施工过程中衬砌渗漏水和快速支护问题,除了应加强对管片接头防水技术研究之外,也要研究考虑和应用其它支护手段,比如基于新奥法 (NATM) 理论的复合衬砌结构,这种结构作为柔性和

刚性结构相结合的现代支护方式,施工比较灵活,能够弥补管片衬砌结构的上述缺陷,但是对于 TBM 隧洞施工,究竟采用管片衬砌结构还是复合衬砌,截止目前世界上尚无经验可循,因此,开展锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌结构在 TBM 施工隧洞中的应用研究,对我国今后海底隧洞,埋深大、地下水位高隧洞的止水及快速支护技术的应用和再创新具有重要的借鉴和推动作用。

2 衬砌结构选择

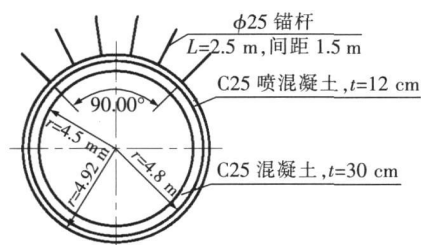
TBM 隧洞施工通常采取的支护手段有锚杆支护、喷混凝土支护、钢拱架支护、混凝土衬砌、注浆以及它们之间的组合支护等,可以依据不同围岩条件和施工方法优化采用相应的支护方式。不同的支护方式其作用原理不同,效果也不相同。

TBM 隧洞支护结构形式一般为两种,如图 1 所示,即锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌;管片衬砌。采用 TBM 进行施工的隧洞断面多为圆形,围岩条件较好,采用管片结构形式可以实现机械化施工,效率高。同时,预制管片采用工厂生产模式制作,精度高,质量容易保证,对结构受力也很有利,而对于锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌来说,它灵活性好,对围岩条件变化的适应性较强,特别是在不良地质地段采用此复合衬砌更具有独特的优势。大伙房输水工程特长隧洞采用锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌主要考虑了以下因素:

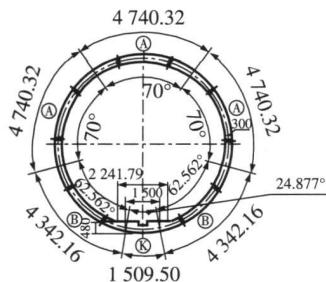
第一,锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌是基于新奥理论的一种现代支护型式,采用 TBM 施工,对围岩扰动小,分期施作支护,符合新奥法的基本原则;采用管片衬砌,虽然能够与 TBM 开挖同步进行施作,对于软弱围岩也能起到及时支护的作用,但对于地质条件较好的围岩,显然违背了新奥法的适时支护原理,而且管片衬砌为刚性衬砌,不能灵活适应围岩变形,还大大增加了衬砌费用。

第二,从图 2 中的 (a) 可以看出,在锚喷支护的基础上增设二次衬砌,除了能提高结构安全系数之外。采用全环内通式模板台车,使 III~V 类围岩的衬砌内径保持一致,比图 2 中的 (b) 管片衬砌内表面更能减小水流局部水头损失。

第三,管片衬砌止水是目前施工及维护管理中的重要难题。漏水的主要原因涉及到环境条件、管片构造、止水材料、施工状况等诸多方面,其中管片接头的漏水是主要原因,如图 3 所示,特别是对于埋深大、地下水位高的隧洞,这样势必形成很高的外水压力,很难解决管片的止水与排水问题,而采用锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌,其止水与排水设计技术已比较成熟。



(a) 复合衬砌



(b) 管片衬砌(长度单位:mm)

图 1 TBM 隧洞的支护结构形式



(a) 复合衬砌



(b) 装配式管片衬砌

图 2 已建成的 TBM 隧洞不同支护结构形式

第四,如果采用管片衬砌作为 TBM 施工的支护型式,据估算工程预制混凝土管片的总量为 $39.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,需要在每个施工段建设管片预制厂,其占地分别为 TBM 1 施工段: $35\ 600 \text{ m}^2$, TBM 2 施工段: $35\ 600 \text{ m}^2$, TBM 3 施工段: $30\ 200 \text{ m}^2$ 。由于施工区为辽宁东部山区,自然植被较好,大量占地会对区域生态环境造成破



(a) 复合衬砌



(b) 装配式管片衬砌

图 3 管片接头的漏水情况

坏,而采用锚喷支护 + 二次衬砌符合衬砌,只须在支洞口设置普通混凝土拌合站即可,无需大面积占地。

第五,从预制管片和模筑混凝土衬砌表面的糙率系数来看,两者相差不多,由于管片接头较多,略高于模筑衬砌。

第六,预制混凝土管片安装后与 TBM 掘进的洞径之间存在着空隙,必须进行填充。工程均采用充填豆粒石并进行灌浆的方法,目的是使管片和围岩接触紧密,形成整体共同承受外力的作用。但是已有的工程实践证明,回填豆粒石不同于衬砌之后的回填灌浆,很难保证将空隙充填密实。

第七,从投资角度讲,将不同类型的 TBM 设备自身投资折合到开挖单价中,采用预制混凝土管片衬砌,其每延米的造价为 $40\ 700 \text{ 元/m}$ (含开挖及支护),而采用锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌,其每延米的造价为 $32\ 900 \text{ 元/m}$,后者比前者每延米节省 $7\ 800 \text{ 元}$ 。

3 TBM 隧洞支护参数设计

影响隧洞结构型式选择和支护参数设计的主要因素有:隧洞功能、工程地质和水文地质条件、施工方法等。埋深大的海底隧洞外水压力也大,全封堵隧洞宜采用圆形衬砌结构型式, TBM 掘进机适合圆形衬砌结

构型式。本工程采用开敞式 TBM 进行施工,其支护衬砌型式按照 NATM 理论设计,采用喷锚支护作为永久支护,同时为了减小隧洞过流表面的糙率,III~V类围岩在喷锚支护基础上进行二次模筑混凝土衬砌。支护参数设计采用工程类比确定,设计选定后还根据现场围岩量测信息对支护参数作必要的调整。

3 1 锚喷支护参数设计

锚喷支护即采用锚杆、喷射混凝土、钢筋网以及钢架等的联合支护。根据有关规范及类似的工程实例确定如下支护参数:

第一,喷射混凝土强度等级为 C25,其与围岩粘结强度不应低于 0.8 MPa。为了增强喷射混凝土的抗渗性、耐久性,在喷射混凝土中掺入无碱速凝剂、高效减水剂及其它外加剂,并掺入 4%~8%的微硅粉。

第二,对 II 类围岩采用锚喷支护作为永久支护。考虑工程耐久性和安全储备,对 II 类围岩,局部安设锚杆 $\phi 22$, $L=2\,500\text{ mm}$,喷 8 cm 高性能混凝土;

第三,对于 IIIa 类围岩,随机布设 $\phi 22$ 锚杆, $L=2\,500\text{ mm}$,喷 12 cm 混凝土;

第四,对于 IIIb 类围岩,顶拱系统布设 $\phi 22$ 锚杆, $L=2\,500\text{ mm}$,局部挂钢筋网 $\phi 8@200\times 200$ 喷 12 cm 混凝土;

第五,对于 IV 类围岩,布设锚杆 $\phi 22$, $L=2\,500\text{ mm}$,全周挂钢筋网 $\phi 8@150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,并架设 I-160 钢拱架,间距 1200 mm,喷 16 cm 混凝土;

(6)对于 V 类围岩,布设锚杆 $\phi 25$, $L=3\,000\text{ mm}$,全周挂钢筋网 $\phi 8@150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,并架设 I-160 钢拱架,间距 600 mm 喷 16 cm 混凝土。

3 2 二次模筑混凝土衬砌

对于 III~V 类围岩,在初期锚喷支护完成,围岩变形基本稳定以后,再进行二次模筑混凝土衬砌。其目的主要有以下几点:

第一,考虑到围岩的不均匀性、支护材料质量的离散性、锚杆腐蚀等不确定因素,衬砌施工后外荷载的变化,隧洞未收敛的变形等,这些都需要设置衬砌作为安全储备,提高支护安全系数。

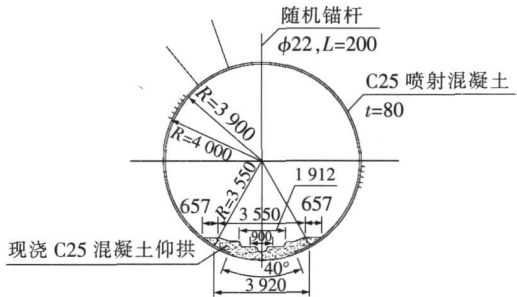
第二,考虑隧洞使用后外力的变化和支护材料的劣化不确定因素,需要提高作为结构的耐久性和安全储备。

第三,III~V 类围岩进行二次模筑混凝土衬砌,可以减小过流表面的糙率,在设计引水流量时,使各类围岩之间的水流实现平稳过渡。

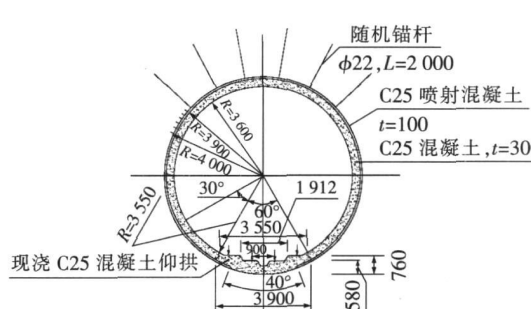
第四,二次模筑混凝土衬砌的厚度,只要能够满足

施工要求的结构厚度即可,由于隧洞衬砌采用全环内通式模板台车进行施工,而且模板台车是刚性定型产品,难以实现不同围岩条件下内径的变化,如果不同围岩采用不同的模板,不但要增大施工的难度,从而影响衬砌施工进度,也会增加投资。另外各类围岩衬砌完成后,不同围岩之间的过渡段很难采用机械施工完成,势必会影响其施工质量。因此,III类围岩衬砌厚度为 30 cm 而 IV、V 类围岩衬砌厚度为 26 cm,使 III~V 类围岩隧洞成洞直径为 7.16 m。

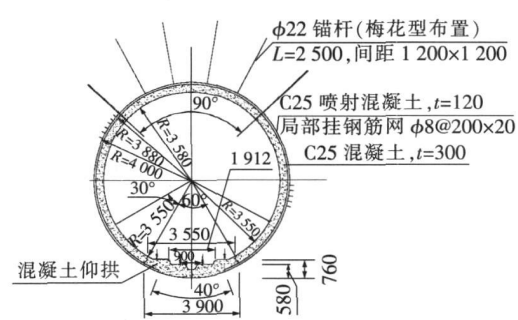
第五,二次模筑混凝土衬砌的混凝土强度等级为 C25,III类围岩衬砌为素混凝土,IV、V 类围岩衬砌内按构造要求设钢筋。隧洞衬砌在围岩地质条件均一洞段每隔 16 m 设置环向施工缝,个别部位增设永久变形缝,设置橡胶止水带。衬砌后对顶拱回填灌浆,TBM 施工段的断面型式如图 4 所示。



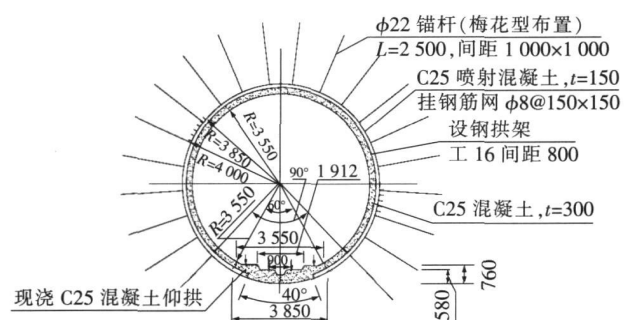
(a) II 类围岩支护衬砌断面



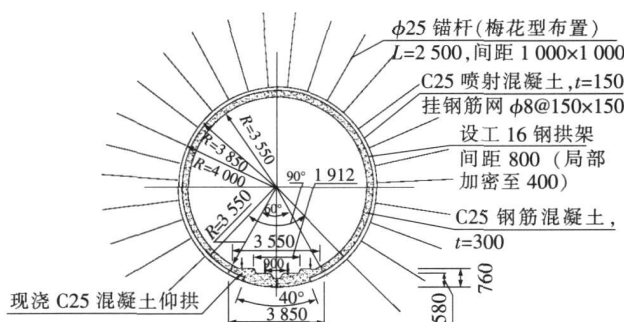
(b) IIIa 类围岩支护衬砌断面



(c) IIIb 类围岩支护衬砌断面



(d) IV类围岩支护衬砌断面



(e) V类围岩支护衬砌断面

图 4 TBM 施工段支护衬砌断面图 (长度单位: mm)

4 TBM 突破不良地质的措施和方法

一旦遇到不良地质条件, TBM 施工速度, 取决于不良地质探测、地层加固处理、支护施工, 设备更换及维修等的能力和时间。TBM 的掘进效率会受到极大的挑战。不良地质对 TBM 的掘进产生了严重影响, 主要表现有:

- (1) 围岩大变形容易卡住 TBM, 或者引起 TBM 的不均匀下沉, 给掘进方向的控制带来困难。
- (2) 开挖面及拱顶坍塌、剥落, 将 TBM 刀盘埋入, 刀盘旋转困难。
- (3) 边墙坍塌, TBM 撑靴支撑不稳, 不能提供 TBM 掘进支反力。
- (4) 刀盘旋转时易产生震动, 影响刀具的使用寿命, 增加刀具消耗。
- (5) 涌水, 工作面及侧壁则会因水压作用发生坍塌。严重涌水会掩埋刀盘及机体, 危及设备、人员安全。
- (6) 不良地质引起的坍塌、涌水等给支护施工带来困难。

4.1 围岩大变形控制主要措施和方法

采用喷、锚、注一体的围岩加固支护系统:

- (1) 开挖后及时支护, 充分利用围岩的自承能力,

将围岩的松动圈转变为承载拱。

(2) 采用钻、锚、注一体的 (自钻式) 注浆锚杆, 如迈式锚杆、GM 锚杆等; 锚杆长度根据围岩屈服范围确定, 以长锚杆为宜; 喷层可以为素混凝土, 也可以是钢筋纤维混凝土。

(3) 可缩性支护: 当开挖引起的围岩扩容 (剪胀或遇水膨胀) 不可避免时, 允许围岩发生适度的变形, 这样可以降低作用于结构上的支护压力, 从而减少超挖量并降低支护强度。

(4) 适当扩挖: 在围岩变形稳定后再架设支护, 更多的则是开挖后立即架设可缩的初期支护。支护方式一般为带纵向伸缩缝的混凝土喷层并辅助以可缩式构件支撑。

4.2 突破断层及其破碎带的措施和方法

- (1) 增加锚杆数量和长度, 喷混凝土及时封闭围岩和超前支护。
- (2) 仰拱及时跟进, 形成封闭结构。
- (3) 对破碎区及坍塌区、渗水区, 必要时注浆加固围岩。
- (4) 坍塌区用铁板封堵, 混凝土封闭或及时快速灌注。
- (5) 变形过大则立即用型钢加固, 必要时在拱脚处打锁脚锚杆。

(6) 调整掘进参数, 降低撑靴对岩面的承压力, 减少扰动, 尽量减少坍塌量; 防止 TBM 退回。

(7) 超前导坑施工, 结合矿山法突破断层及破碎带。

4.3 涌 (渗) 水控制的措施和方法

采用钻爆法施工, 即使涌 (渗) 水达到 $2.5 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 的数量, 也很容易得到处理。但采用 TBM 法, 开挖面只要有大于 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 的渗水量, 就会产生比较大的问题。

不管采用哪种 TBM 施工, 当地质勘查或超前地质预报探明前方可能出现较大规模的涌 (渗) 水时, 解决此问题的最有效方式, 就是用最少的钻孔, 对刀盘前方做全环封闭栓塞式的超前预灌浆处理。

4.4 岩爆主要控制措施和方法

- (1) 改善围岩物理力学特性。
- (2) 主要措施是开挖后立即向掌子面及附近洞壁喷洒高压水或利用钻孔向岩体深部注水。
- (3) 应力解除, 具体方法有 (大口径) 超前钻孔和纵向切槽等。

(4) 及时施作锚、喷、网、钢架支护。

4.5 不良地质段变形加固处理措施

- (1) 在 TBM 掘进通过, 围岩出现了较大的变形

时,为了控制围岩变形、保证 TBM 安全通过不良地质,采用“两封一灌”的加固方案。

(2) 底板钢拱架采用 II0 工字钢和 $\phi 25$ 锁脚连接,使钢拱架形成一个封闭的骨架,如图 5 所示。

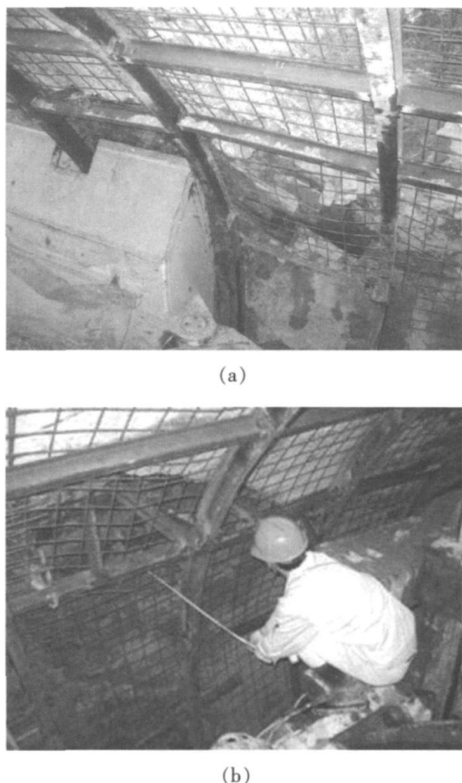


图 5 不良地质段变形加固处理措施

(3) 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。

(4) 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;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。

5 工程应用

图 4 中给出的 II ~ V 各类围岩的设计参数都是在参比同类工程而做出的,为了验证所提出的优化设计方案的合理性,TBM 施工过程中对 IV、V 类岩按照一定断面间距进行了拱顶下沉与周边位移收敛变形监测。现以其中桩号 23+866 断面的测点为例,来介绍 TBM 施工采用优化支护系统后的抗变形能力。

桩号 23+866 位置处的围岩为 IV 类,岩性为肉红色正长斑岩和灰绿色糜棱岩,围岩节理裂隙发育,节理多微张,充填岩屑或泥质,围岩局部有节理切割体塌落现象。该位置附近发育两个小断层。采用 TBM 进行开挖,围岩出护盾后就进行锚喷支护,并架设钢拱架,图 6~9 为该断面 13 d 内的拱顶下沉与周边收敛监测结果。

监测结果显示,该断面最大拱顶下沉量为 1.5 mm,周边收敛量最大值小于 4 mm。从图 7、图 9 的下沉速率与收敛速率均呈现先增加后减小逐渐呈现收敛的趋势。因此,以该断面为代表的洞身围岩,在监测期间拱顶下沉量与周边收敛量较小,下沉速率与收敛速率呈现收敛的趋势,这表明洞身围岩在开挖支护后变形较小,整体稳定,同时也说明支护系统优化效果明显。

对根据图 6~图 9 的拱顶下沉与收敛变形观测曲线进一步分析可以看出,洞室围岩在初期支护以后的变形非常小,远小于规范允许的相应类别的围岩变形。原因最主要可能是由于设备,测点距离掌子面太远。根据隧洞开挖过程中掌子面三维影响,随掌子面的开挖进展而产生围岩位移,在毛洞时,掌子面达到前,已发生约 30% 的位移,而在掌子面后方约 3~5 洞径左右位移基本收敛。因此,测点所观测到的只能是后期的变形。但也足以证明 IV、V 类岩在采取及时支护以后能够保证洞室的稳定。

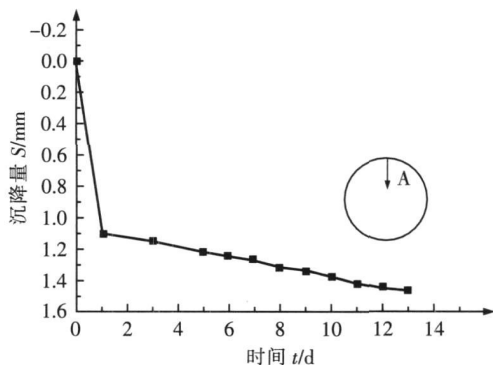


图 6 桩号 23+866 位置处拱顶沉降量

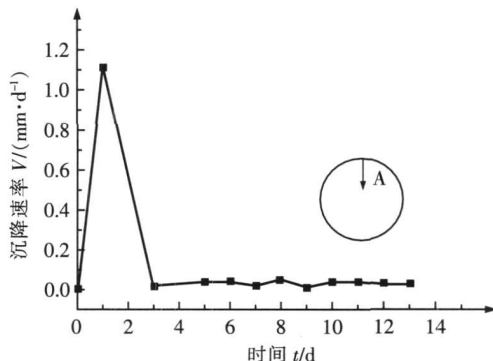


图 7 桩号 23+866 位置处拱顶下沉速率

6 结论

以大伙房输水工程特长隧洞为例,对特长隧洞的衬砌结构型式选择、支护参数、突破不良地质的措施和方法进行了研究和分析,主要得出以下结论:

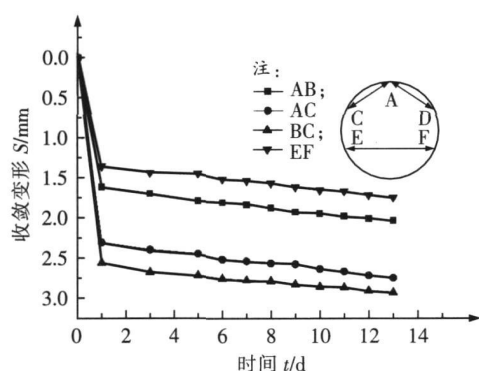


图 8 监测断面周边收敛变形

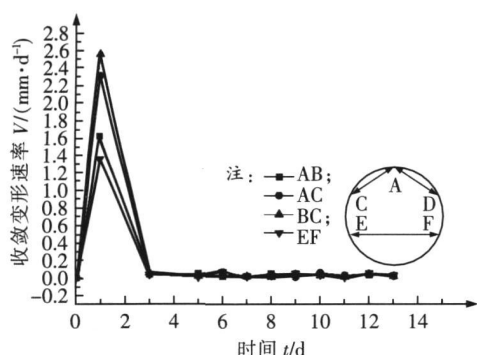


图 9 监测断面周边收敛变形速率

(1) 根据大伙房输水工程特长隧洞所穿越区域的工程地质状况和施工方法, 采用锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌替代管片衬砌, 开拓了 TBM 隧洞施工的先例, 符合现代支护系统的 NATM 设计理念。

(2) 现场隧洞拱顶下沉与周边收敛监测结果表明, TBM 隧洞结构设计参数以及 TBM 突破不良地质地带的措施和方法等等是合理的, 锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌替代管片衬砌, 不仅减小了输水隧洞的水流局部水头损失, 解决了 TBM 施工的止水与排水难题还节约了大量土地和大量资金, 虽说采用锚喷支护 + 二次衬砌复合衬砌施工比起管片衬砌施工速度较低, 但是采用最新研发的全环内通式模板台车施工能够满足二次衬砌紧跟工作面的要求, 为其它类似隧洞的施工建设提供了有力参考。

参考文献:

[1] 梅志荣, 高菊茹, 唐与, 等. 大伙房输水工程特长隧洞 TBM 施工关键技术研究 [R]. 成都: 中铁西南科学研究院, 2009

Mei Zhirong Gao Juru Tang Yu, etc Study on Key Construction Technology for Super-long Tunnel of Dahufang Transfer Project [R]. Chengdu China Railway Southwest Research Institute, 2009

[2] 梅志荣, 张军伟, 章元爱, 等. 大伙房输水工程特长隧洞施工方法优化与 TBM 选型研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009

Mei Zhirong Zhang Junwei Zhang Yuanai, etc Study on Optimization of Construction Method and TBM Lectotype technology of Super-long Tunnel [D]. Chengdu Southwest Jiaotong University Press, 2009

[3] 周佳媚, 李志业, 高波. TBM 施工隧洞仰拱预制块的受力分析 [J]. 中国铁道科学, 2004(3): 32-35

Zhou Jiamei Li Zhiye Gaobo, etc Mechanic Analysis of Invert Prefabricate in TBM Construction Tunnel [J]. China Railway Sciences, 2004(3): 32-35

[4] 王梦恕, 李典璜, 张镜剑, 等. 岩石隧洞掘进机 (TBM) 施工及工程 [M]. 北京: 中国铁道科学出版社, 2004

Wang Mengshu Li Dianhuang Zhang Jingjian, etc Tunneling with Rock TBM and Related Case Histories [M]. Beijing China Railway Publishing House, 2004

[5] 尹俊涛, 尚彦军, 傅冰骏, 等. TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策 [J]. 工程地质学报, 2005(3): 389-397.

Yin Juntao Shang Yanjun, Fu Bingjun, etc Development of TBM Excavation Technology and Analyses and Countermeasures of Related Engineering Geological Problems [J]. Journal of Engineering Geology, 2005(3): 389-397.

[6] 张镜剑, 傅冰骏. 隧洞掘进机在我国应用的进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(2): 226-238

Zhang Jingjian Fu Bingjun Advances in Tunnel Boring Machine Application in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(2): 226-238

[7] 钱七虎, 李朝甫, 傅德明. 全断面掘进机在中国地下工程中的应用现状及前景展望 [J]. 建筑机械, 2002(5): 28-35.

Qian Qihu Li Chaofu Fu Deming Application Situation and Outlook of TBM in Underground Project in China [J]. Construction Machinery, 2002(5): 28-35.

[8] 王梦恕. 开敞式 TBM 在铁路长隧洞特硬岩、软岩地层的施工技术 [J]. 土木工程学报, 2005(5): 54-58

Wang Mengshu Construction Technology on Open TBM in Hard Rock and Soft Rock of Long Railway Tunnel [J]. Civil Engineering Journal, 2005(5): 54-58

[9] C. Carranza-Torres, M. Diederichs. Mechanical Analysis of Circular Liners with Particular Reference to Composite Supports [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009(24): 506-532

- [10] Kourosh Shahrîar, Mostafa Sharifzadeh, Jafar Khademi Hamidi. Geotechnical Risk Assessment Based Approach for Rock TBM Selection in Difficult Ground Conditions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008(23): 318–325.
- [11] Thomas Kasper, etc. A Numerical Study of the Effect of Soil and Grout Material Properties and Cover Depth in Shield Tunneling [J]. *Computers and Geotechnics* 2006(33): 234–247.
- [12] Katsushi Mura. Design and Construction of Mountain Tunnels in Japan [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2003(18): 115–126.
- [13] Marcio Muniz de Farias. Displacement Control in Tunnels Excavated by the NATM: 3-D Numerical Simulations [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004(19): 283–293.
- [14] Moorak Son. Ground – liner Interaction in Rock Tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007(22): 1–9.
- [15] 张军伟, 梅志荣, 唐与, 等. 大伙房输水工程特长隧洞 TBM 选型及支护系统优化研究 [J]. *铁道工程学报*, 2010(3): 61–65.
- Zhang Junwei, Mei Zhirong, Tang Yu, etc. TBM Type-selection and Study on Optimization of Support System for Super Long Dahuofang Water Tunnel [J]. *Journal of Railway Engineering Society* 2010(3): 61–65.
- [16] 徐占良. 开敞式 TBM 在管涔山隧道施工的适应性研究 [J]. *铁道工程学报*, 2007(8): 53–57.
- Xu Zhanliang. Research on the Adaptability of Open-type TBM in the Construction of Guancen Mountain Tunnel [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2007(8): 53–57.

(上接第 38页)

- Ren Jianying, Su Mubiao, Li Wenping, etc. Study on Vertical Loaded Free Frequencies of Railway Continuous Bridges [J]. *Journal of the China Railway Society* 2005(5): 111–116.
- [5] 任剑莹, 李文平, 苏木标. 铁路预应力混凝土连续梁桥竖向有载自振频率研究 [J]. *国防交通工程与技术*, 2004(5): 24–25.
- Ren Jianying, Li Wenping, Su Mubiao. A Study of the Vertical – loaded Free Frequencies of the Railway Continuous Pre – stressed Concrete Bridges [J]. *Journal of National Defence Traffic Engineering and Technology*, 2004(5): 24–25.
- [6] 任剑莹, 苏木标, 李文平. 铁路连续钢桁梁桥竖向有载自振频率研究 [C] //第十三届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2004. 371–376.
- Ren Jianying, Su Mubiao, Li Wenping. Study on Vertical Loaded Free Frequencies of Railway Steel Truss Continuous Bridge [C] //The Proceedings of the 13th Nationwide Structural Engineering Academic Meeting. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 371–376.
- [7] 王福天. 车辆动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- Wang Futian. *Vehicle Dynamics* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983.
- [8] 蒋存煜. 有限元基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- Jiang Cunyu. *The Basis of Finite Element* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984.
- [9] 苏木标, 李建中, 梁志广. 铁路简支梁桥竖向有载频率研究 [J]. *铁道学报*, 2001(2): 76–80.
- Su Mubiao, Li Jianzhong, Liang Zhiguang. Study on Vertical Loaded Frequencies of Railway Simply Supported Beam Bridges [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2001(2): 76–80.