

文章编号:1006-2106(2001)01-0058-04

铁路膨胀岩隧道施工技术研究

董新平*

(中铁隧道工程局 科研所, 洛阳 471009)

提 要: 本文对国内外大量膨胀岩隧道工程实例和监测资料进行了总结、分析, 由此提出了膨胀岩隧道的设计、施工原则以及隧道施工方法, 并结合当前的工程实践, 介绍了膨胀岩隧道的施工对策。

关键词: 膨胀岩; 施工; 有限元

中图分类号: U455 **文献标识码:** A

膨胀岩对温度、湿度、应力、地下水等环境因素变化极为敏感, 易风化和软化。在我国分布极为广泛。我国在云台山、小坪、西山等膨胀岩隧道修建过程中, 积累了很多经验, 但总体上, 与世界上先进国家尚有一定的差距, 现已修建的多座膨胀岩隧道在工程后期或投入运营后, 出现底鼓、衬砌开裂等病害, 被迫进行综合整治, 严重影响工程的按时竣工和正常运营。

1 膨胀岩隧道设计、施工原则

膨胀岩常常表现为“复合型”力学变形机制, 是力学、渗流、物理化学、流变等效应相互作用的结果。在工程的不同阶段, 各效应的支配地位不尽相同, 大体可分为两个阶段: (1) 在开挖初期。以力学效应(粘塑性变形)为主。力学效应引起的地下水迁移是物化效应的契机和诱因; (2) 工程后期。以物化效应、流变效应为主。开挖引起渗流, 导致围岩吸水膨胀, 在隧道周边形成含水量升高区。围岩含水量的变化在很大程度上控制着力学卸载和物化膨胀相互转化整个过程的发展进程。

膨胀岩变形力学机制表明, 膨胀岩隧道设计、施工应符合以下原则:

(1) 应明确膨胀机制, 设计、施工措施应有针对性;
(2) 采用合理的断面型式。双线采用马蹄形, 单线采用圆形。隧道的支护体系应适应膨胀岩隧道初期变形大、变形迅速、持续时间长的特点, 满足刚柔并济的原则;

(3) 施工尽可能避免大范围松弛区(卸载区)产生,

减少裂缝产生的扩展;

(4) 严格控制施工用水和围岩含水状态的变化, 避免水大范围迁移;

(5) 支护应闭合迅速, 支护时间合理;

(6) 软化和流变特征对塑变区向纵深方向发展影响较大, 应采取措施改善围岩特性, 提高其自承能力。

2 典型膨胀岩隧道监测资料分析

典型膨胀岩隧道量测资料分析表明, 中、强膨胀岩隧道的变形特征为:

(1) 最终位移量大, 可达 20~50 cm, 初期变形迅速;

(2) 流变特征明显, 变形持续时间大, 影响范围大, 一般为 3 d~5 d;

(3) 最终位移值与隧道的埋深近似呈线形关系, 埋深增大, 地应力增加, 膨胀岩隧道将以“复合型”膨胀为主, 导致变形急剧增加;

(4) 提高支护刚度和快速闭合可有效抑制变形的持续发展。在台阶法开挖时, 上台阶开挖所引起的位移是主要的, 缩短台阶长度, 加快闭合, 是抑制变位的有效措施;

(5) 变形曲线可用以下形式的曲线进行回归:

$$y = y_0 + A_1 \cdot (1 - e^{-x/t_1}) + A_2 \cdot (1 - e^{-x/t_2}) \quad (1)$$

3 膨胀岩隧道施工方法

膨胀岩隧道施工多采用全断面、短台阶法、微台阶法以及各种导坑法等。在隧道开挖初期, 围岩以力学机

* 收稿日期 2000-11-05 董新平 工程师(硕士) 男 1970 年出生

制为主,也是施工过程中应积极予以控制的阶段,采用二维非线性有限元对常用几种施工方法予以模拟。分析中屈服准则采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,理想弹塑性模型,不考虑软化问题。隧道型式选取第一白板隧道、云台山隧道、单线圆型断面型式。

围岩用四节点等单元模拟,锚杆和支护采用杆单元模拟。分步开挖效应用隧道分布开挖后等效荷载的释放系数来模拟。荷载全部作用在初支护上,不考虑二次衬砌的作用。

分析表明:膨胀岩稳定性不仅与最终状态相关,而且与加载历程(应力路径)相关。全断面法一次开挖成型,支护结构可快速封闭成环,对围岩施加较大的约束力,围岩的应力状态较好,与各种分布开挖法相比,无受力不利的中间过程存在,因此塑性区的范围、深度较分步开挖小,同时,隧道周边变形也较小。

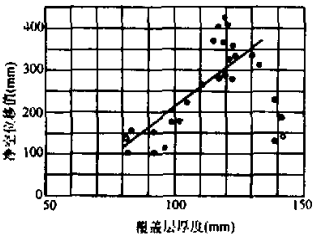


图 1 岩手隧道最终位移值与埋深关系

短台阶法施工,上台阶开挖后,较低的围岩强度比以及应力集中使在拐角处产生较大的应力和大范围塑性区形成,并伴有底鼓发生,底鼓主要由上台阶开挖引起的,该阶段是隧道开挖过程中的不利状态。

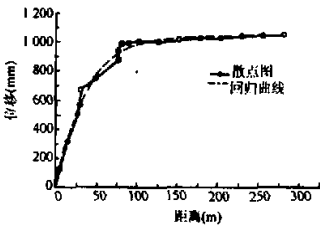


图 2 惠那山隧道位移回归曲线

微台阶法与短台阶法相比,台阶更短,上台阶开挖后的应力集中程度、超应力范围均较小,可保证支护迅速闭合,因而,围岩的位移、塑性区也较短台阶法小。

中心导坑法施工可降低上台阶仰拱的隆起程度,其塑性区的分布情况也优于短台阶法施工。

因此,膨胀岩隧道施工,应优先采用微台阶法;采用短台阶法施工时,应尽可能缩短台阶长度,上台阶宜采用临时仰拱并结合其他措施如加强排水、打设纤维

锚杆等进行底鼓控制。施工方法优化和围岩改良综合进行;

在大跨、浅埋、中、强膨胀岩隧道中采用侧壁导坑法。

预衬砌法可有效控制初期变形,确保施工快速封闭,减少地层应力扰动,对断面形状适应性好,因此,在膨胀岩隧道中有良好的应用前景。

4 膨胀岩隧道施工对策

4.1 预留变形量

开挖尽量采用光面爆破或机械开挖,在强膨胀地段,为避免侵入净空,应留足预留变形量,预留变形量宜 $<10\text{ cm}$ 。

表 1 日本典型膨胀岩隧道的预留变形量(cm)

隧道	新宇佐美	第一白板	惠那山	新宇津	岩手
预留变形量	5~20	5~10	上半部:50 下半部:50~30 仰拱:15	10	上半部:20 下半部分:12

4.2 支护必须有较大的刚度、韧性,以适应膨胀岩初期变形大的特点

常规锚喷支护,在埋深大、围岩强度小时,支护刚度与围岩不能匹配,致使大变形发生,导致锚杆断裂,喷层开裂,钢架扭曲,使支护体系失效。为此应采用联合支护,提高支护体系的整体刚度;使支护体系具有跟踪变形的能力,提高支护的韧性。

4.2.1 钢支撑

膨胀岩隧道多应用喷锚和各类型钢的联合支护。型钢应用较多的有 Mu29 型可缩性支撑、H150~200 型(可缩或不可缩)。当前可缩拱架在施工中存在很多问题,如钢支撑不能提供足够的工作抗力等,为充分发挥其作用,一般从卡缆选择、型钢选型、提高工作阻力、优化施工程序等方面予以解决。

(1)卡缆选择。宜采用带限位块、经热处理的双槽夹板卡缆。

(2)工作阻力以及紧固力矩确定

拱架的紧固力矩是联合支护的重要参数,可由接头实验来确定,如 Mu29 型、U 型螺杆卡缆接头试验表明在扭紧力矩 $>15\text{ t}$ 时,滑动阻力增加不明显,故扭紧力矩多取 15 t ,滑动阻力取 10 t 左右。

近年大量研究表明,支护强度是控制软岩巷道围岩变形,尤其是后期流变变形的关键,支护阻力达到 0.3 MPa 左右时,才能有效地控制围岩强烈变形。支

护阻力的确定应以此为原则:根据预定的支护阻力,由隧道断面型式以及断面大小,通过试验或计算来确定,然后,通过接头的荷载—扭矩试验来确定卡缆的扭矩。

卡缆施工应采用风动扭力扳手,以保证扭力矩达 $300 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上。

可缩支撑滑动量可取 $20 \sim 30 \text{ cm}$,接头数取 $2 \sim 6$ 个,分布于变形大和应力集聚处。

(3)应优先采用经过热处理、屈服强度提高的优质型钢。经过调质处理后, Mu29 型钢的屈服强度提高 40%。相当于 36 kg/m U 型钢的极限强度。

4.2.2 柔性喷层

(1)柔性材料的选择

目前在大变形隧道以及其它地下工程中多用钢纤维喷射混凝土和其他一些柔性外加剂混凝土以及聚合物增塑混凝土。应用较多的是钢纤维混凝土。据挪威等国测试,钢纤维混凝土的单轴抗拉强度达 $4 \sim 5 \text{ MPa}$ 、弯曲强度达 $8 \sim 10 \text{ MPa}$,粘结力可提高 50%、耐久性可增加 $5 \sim 10$ 倍,因而能改善围岩受力状态,适应膨胀岩大变形的特点。同时,现有的工艺基本可保证喷射混凝土的密实均一。因此,应优先采用钢纤维混凝土。

替代钢纤维混凝土的柔性喷层中,建议采用选择木质磺酸钙作为缓凝剂,使喷层初期呈胶状,保证围岩在开挖初期大变形时喷层不开裂,而在变形趋于稳定时,强度不降低。同时该方法操作方便,无须特殊机具及繁杂的添加方法,容易控制,成本低廉。经过 8 年以上的工程实践,证明效果很好。

初喷,木质磺酸钙为水泥重量的 0.325%。

(2)钢纤维混凝土参数选择

在膨胀岩隧道中采用弯钩型钢纤维。刚纤维参数见表 2。

表 2 我国建议的钢纤维喷射混凝土中钢纤维参数

参数	长度 (mm)	(等效)直径 (mm)	长径比	钢纤维体积比 (%)
参数值	20~25	0.3~0.5	50~60	1.0~1.5

根据挪威对长 40 mm 、粗 0.5 mm 钢纤维的使用情况来看,其可达到新标准的韧性或刚性,而且,通过正确设计、湿喷、添加附加剂等手段,可使混凝土达到均质和高强 ($55 \text{ MPa} \sim 100 \text{ MPa}$),且无附加回弹,因此,为提高钢纤维喷射混凝土的韧性,应积极推广采用较长的钢纤维 ($>25 \text{ mm}$)。

(3)伸缩缝的设置

在强膨胀性地段,为使喷层跟踪变形,可采用伸缩缝。伸缩缝宽度一般为 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 。如: Karawanken 隧道在上台阶设置 5 段,间隔 30 cm 。惠那山隧道设置 6 条,宽度 25 cm 。

4.2.3 锚杆

常规锚杆很难适应 5 cm 的变形,世界各国开发了多种可拉伸锚杆,在一些膨胀岩隧道应用情况表明,效果明显。如 Karawanken 隧道采用的 CD 型可拉伸锚杆可适应 20 cm 的变形。目前我国也开发了多种可拉伸锚杆,主要类型有:

(1)孔口可缩式

弹簧孔口可缩锚杆见图 3,当锚杆受力后,弹簧逐渐压缩,即锚杆在围岩内加长,起到释放地压的作用,当弹簧达到压缩极限后,便不再允许围岩变形,而保持恒定阻力。

(2)摩擦钢管式可拉伸锚杆

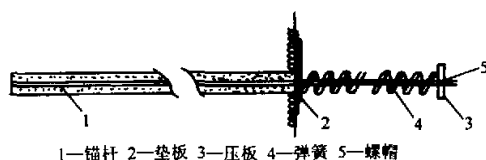


图 3 弹簧孔口可缩锚杆

(3)杆体可拉伸锚杆

其中,全长锚固的孔口可伸缩或波形可拉伸锚杆因其锚固力大,操作简单,施工方便,适合于膨胀岩隧道的施工。

4.2.4 围岩加固

注浆是常用的加固围岩的一种手段,但由于其作为一种非常规的支护方式,需要特殊的施工机具,常给施工带来不便,最近开发的外锚内注法已有效解决了该方面的施工问题,可作为膨胀岩隧道加固围岩的主要措施。

(1)外锚内注原理:从工艺上把锚杆支护和围岩注浆有机结合起来,利用锚杆兼作注浆管,通过注浆管加固围岩,在围岩内形成一连续的注浆加固圈,锚杆通过与围岩相互作用和加初锚固力,在围岩内又形成加固圈,加上喷射混凝土形成完整的支护系统。可有效加固围岩。注浆锚杆杆体用无缝钢管制作,锚杆内段为注浆段,锚杆尾部有螺纹可接注浆管,外段为锚固段;锚固段采用空心快硬水泥卷锚固,锚固段又是注浆密封段,有效解决了外锚内注的关键技术——软弱围岩注浆的密封问题。

该法解决了注浆作为非常规支护手段,难于推广应用的难点。可采用常规的打眼机具和注浆设备。变注浆为常规支护。

(2)外锚内注施工工艺

注浆材料一般可选用单液水泥浆,选用高标号普通硅酸盐水泥,并掺入适量速凝剂。注浆设备可选单液

注浆泵，注浆压力可为 1~3 MPa。

施工工艺十分简便，施工准备→打锚杆孔→安装注浆锚杆→注浆→安装锚杆托板。安装注浆锚杆时，水泥药卷必须浸透水并冲捣密实。

4.3 辅助工法

在膨胀岩隧道的施工要采取技术措施以保证施工的安全(见表 3)

4.4 支护以及衬砌施工的一些技术要求

(1)严格控制施工用水，及时排除洞内积水，排水措施必须有效、畅通；

(2)在地应力大的复合型膨胀岩隧道，在常规支护手段难以奏效时，应考虑充分卸压，可采用预留刚柔层、预留刚隙层技术；

(3)膨胀岩隧道的二次衬砌设置应遵循以下原则：①应尽早进行，以提供足够的阻力限制围岩的变形，但应避开三维空间效应，一般在 3 d~4 d 以后，变形基本稳定时进行；②为防止二次衬砌开裂，应设置防止裂缝钢筋，或采用钢纤维混凝土。

5 结论

膨胀岩作为特殊工程地质，必须从勘测开始就重

视实验和分析，明确膨胀成因，对膨胀特性正确认识和评价，设计施工中采取有针对性措施，才能减轻或避免病害，取得较好的经济和社会效益。

表 3 辅助工法

检验点	施工中的现象	措施(A)	措施(B)
		较易实行的	包括增加构件在内需采取较大的措施
	发生底鼓	及早喷射仰拱混凝土	1. 在仰拱处增打锚杆 2. 缩短台阶长度，尽早闭合支护环 3. 采取短台阶(超短台阶) 4. 用正反仰拱
锚杆	轴力增大锚杆断裂	1. 加长锚杆 2. 采用等强无螺纹锚杆 3. 采取可拉伸锚杆	1. 增加锚杆 2. 采取大承载力锚杆
围岩内变位	围岩内变形增大松弛区异常增大	1. 缩短从开挖到支护的时间 2. 提前锚杆的安装时间 3. 减少钻爆开挖对围岩的扰动	1. 增加锚杆 2. 缩短台阶长度，及早闭合成环 3. 用短台阶法和临时仰拱法交替施工 4. 背后注浆
内空变位	内净空变位增大变形速率增大	1. 缩短开挖到支护的时间 2. 提早锚杆的安装 3. 缩短台阶、仰拱一次开挖长度 4. 在喷射混凝土开裂设置纵向伸缩缝	1. 增加和加长锚杆 2. 尽早成环 3. 上台阶施工时应用临时仰拱或连接金属构件(用槽钢将隧道纵向连接) 4. 变更施工方法 5. 下断面、仰拱同时施工

STUDY ON CONSTRUCTION TECHNOLOGY FOR RAILWAY TUNNELS WITH EXPANSIVE SURROUNDING ROCK

DONG Xin-ping

China Railway Tunnel Engineering Bureau

Abstract: Based on the summary and analysis of a large amount of engineering practices and supervision informations on railway tunnels with expansive surrounding rock in home and abroad, the principles of design and construction and the construction methods for tunnels with expansive surrounding rock are proposed. Combined with the recent practical engineering projects, the countermeasures for constructing tunnels with expansive surrounding rock are introduced also in this paper.

Keywords: expansive surronuding rock; construction; finite element

铁路膨胀岩隧道施工技术研究

作者：[董新平](#)

作者单位：[中铁隧道工程局科研所](#)

刊名：[铁道工程学报](#) 

英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)

年，卷(期)：2001(1)

被引用次数：4次

引证文献(4条)

1. [韩永亮](#) [乌鞘岭隧道软膨胀岩特性分析及施工对策](#)[期刊论文]-[石家庄铁路职业技术学院学报](#) 2005(2)
2. [李红军](#), [刘成禹](#), [李云](#) [锚注联合支护效果的数值模拟研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2010(7)
3. [蔺俊杰](#) [隧道膨胀岩地段施工工艺与质量控制措施探讨](#)[期刊论文]-[甘肃科学学报](#) 2011(3)
4. [陈鸿](#), [汪大新](#) [膨胀土隧道仰拱施工技术](#)[期刊论文]-[隧道建设](#) 2010(5)

引用本文格式：[董新平](#) [铁路膨胀岩隧道施工技术研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2001(1)