

文章编号:1671-2579(2012)06-0242-05

膨胀性围岩公路隧道设计施工研究

赵峰¹, 夏永旭², 贾艳领³

(1. 中交远洲交通科技集团有限公司, 河北 石家庄 050051; 2. 长安大学; 3. 广西交通科学研究院)

摘要: 膨胀岩隧道由于其特殊的工程地质特性,成为当今地下工程界最复杂的研究课题之一。结合依托工程大华岭特长隧道中出现的膨胀岩,提出了膨胀性围岩隧道的支护结构和施工原则。应用弹塑性模型对膨胀岩隧道支护结构和施工过程进行了数值模拟计算,结果显示支护结构的初期支护及二次衬砌主要应力均在安全范围之内。

关键词: 公路隧道; 膨胀岩; 数值模拟; 隧道设计; 隧道施工

膨胀性围岩一般是指在水的物理化学作用下发生体积膨胀的围岩。常见的膨胀性围岩有:泥岩、页岩、长石、云母、蛇纹岩和含硬石膏、无水芒硝、钙芒硝等岩石以及主要由强亲水性矿物组成的粘土等。由于具有遇水膨胀的特性,膨胀岩隧道在施工和运营过程中经常产生较多的病害。膨胀岩隧道(洞)常见的病害包括围岩开裂、导坑下沉、坍塌冒顶和底鼓等;衬砌变形包括拱圈、拱脚、边墙尤其是仰拱的变形等。中国已建成的通过膨胀岩地层的隧道(洞)有南岭隧道、关角隧道、崔家山隧道、桃坪隧道、云台山隧道和引滦入津隧洞等。影响隧道内膨胀岩性能变化的因素较多,如膨胀性矿物的成分及含量、物理力学指标、地下水、衬砌结构刚度和施工方案等。由于人们对于膨胀岩的认识尚不成熟,在判别膨胀岩等级、膨胀量和膨胀压力的方面

国内外尚无统一的判别标准,加之隧道工程的复杂性,导致上述已建成的隧道(洞)出现了不同程度的变形和破坏。本文结合河北省张承高速公路大华岭特长隧道设计和施工工程中的经验,对膨胀岩隧道的支护结构和施工方案进行研究,以期对今后类似工程提供有益的帮助。

1 膨胀岩隧道结构设计

1.1 工程地质条件

张(家口)一承(德)高速公路张家口段设计速度80 km/h,设计标准为双向四车道,全线共设置隧道4座,其中大华岭特长隧道长5 300 m。该隧道主体岩性为侏罗系陶北营组流纹岩与凝灰质流纹岩,由于隧

的减震措施,如选用低爆速炸药、控制爆破进尺等。迎爆侧边墙等危险部位要做好监控量测工作,如有必要还应进行加固处理,确保隧道的稳定与安全。

参考文献:

- [1] 张程红. 邻近隧道爆破施工引起的既有隧道衬砌振动速度阈值分析[D]. 兰州交通大学硕士学位论文,2009.
- [2] 顾翠莲. 相邻特大断面隧道爆破施工相互影响的研究[D]. 同济大学硕士学位论文,2007.
- [3] 夏祥,李俊如,李海波,等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. 岩土力学,2005(1).
- [4] 潘晓马. 邻近隧道施工对既有隧道的影响[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2002.
- [5] 崔可佳. 浅埋城市隧道爆破施工对地表及临近既有隧道振动影响的研究[D]. 重庆大学硕士学位论文,2008.

- [6] 王明年,潘晓马,张成满,等. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学,2004(3).
- [7] 钟建辉. 邻近隧道爆破施工对既有隧道影响的数值分析[D]. 天津大学硕士学位论文,2005.
- [8] 文曦. 既有隧道受临近隧道爆破开挖影响及安全性评估研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文,2008.
- [9] 毕继红,钟建辉. 邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J]. 工程爆破,2004(4).
- [10] 戴向胜. 长距离小净距隧道爆破开挖振动标准的研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文,2008.
- [11] 李云鹏,艾传志,韩常领,等. 小间距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2007(1).
- [12] 柴国辉,柴旺. 爆破振动下小净距隧道围岩的力学行为分析[J]. 西部交通科技,2010(2-3).

收稿日期:2012-03-13

道洞身受到6条断层影响,围岩整体较差,多为Ⅳ级、Ⅴ级围岩。根据勘设阶段试验资料,该隧道膨胀岩主要为分布在中生界侏罗系火山岩中的斑脱岩(膨润土)、斑脱岩(蒙脱石)化火山岩等,随机分布于隧道洞身部位,膨胀岩岩样自由膨胀率大多在30%~70%之间。此类膨胀性围岩由火山岩风化而成,沿其火山岩的裂隙呈不规则状分布,单个膨胀岩体的规模变化很大,厚度由十余厘米至十几米变化不等。对应于不同的蒙脱石含量,膨胀岩颜色多为绿色、黄绿色两种。

1.2 膨胀岩等级判别

目前,中国对膨胀岩的分类仍没有统一的定量判别与分级标准。一般情况下,工程界多将膨胀岩分为强、中、弱3种情况,但分级标准并不统一。表1为部分资料给出的膨胀岩分级标准。根据设计阶段大华岭隧道膨胀岩的自由膨胀率试验结果,判别该隧道膨胀岩为弱~中等膨胀岩。

表1 膨胀岩分类标准

围岩分类	干燥饱和吸水率/%	极限膨胀量/%	自由膨胀率 F_s /%
强膨胀岩	>50	>30	$F_s \geq 70$
中膨胀岩	30~50	15~30	$50 \leq F_s < 70$
弱膨胀岩	10~30	3~15	$30 \leq F_s < 50$
非膨胀岩	<10	<3	$F_s < 30$

1.3 膨胀岩隧道结构设计

膨胀性围岩隧道除拱部承受较大的围岩压力外,边墙和底部也承受了很大的膨胀压力,为适应膨胀压力分布,支护结构采用圆形或者接近圆形的断面最好。由于围岩变形较大,隧道开挖断面应预留较大的变形量。膨胀岩隧道设计采用先柔后刚、先放后顶、分层支护的方法,按照加强掌子面、拱脚、仰拱围岩稳定,防止衬砌断面挤入和开裂,建立日常监控量测体系,加强施工超前预测等原则进行处理。

根据勘察阶段膨胀岩判定结果,在大华岭隧道设计过程中,预设了中等膨胀岩支护及弱膨胀岩支护两种结构设计方案。设计中主要采取了下列措施:

(1) 及时封闭掌子面,喷射8 cm厚C25混凝土,加强掌子面稳定。

(2) 适当增大预留变形量,设计采用25 cm,施工时根据监控量测结果及时调整。

(3) 控制围岩变形,拱部边墙采用6 m长自进式中空注浆锚杆,防止围岩变形过大。

(4) 加强拱脚和基底处理,拱脚采用3.5 m长 $\phi 42$ 注浆小导管,基底视围岩完整情况采用3.5 m长 $\phi 42$ 注浆小导管或5 m长自进式中空注浆锚杆,控制侧壁挤入和底鼓。

(5) 采用全环封闭的支护结构,二衬设计为C30加强型钢筋混凝土结构。

(6) 采用环形导坑预留核心土开挖方案,尽量减小围岩变形,及时施作仰拱,封闭围岩。

弱膨胀岩段隧道支护结构设计中主要采取了下列措施:

(1) 在掌子面喷射8 cm厚C25混凝土,加强掌子面稳定。

(2) 预留变形量采用22 cm,施工时根据监控量测结果及时调整。

(3) 拱部边墙采用5 m长自进式中空注浆锚杆,控制围岩变形,防止围岩变形过大。

(4) 采用全环封闭的支护结构,二衬设计为C30加强型钢筋混凝土结构。

(5) 采取环形导坑预留核心土开挖方案,尽量减小围岩变形,及时施作仰拱,封闭围岩。

1.4 隧道防排水设计

大华岭隧道项目地处北方,降雨量相对较小,隧址区地下水主要为上部松散层孔隙潜水和基岩裂隙水。隧道内可能会出现渗水、滴水现象,局部出现淋雨状水。水对膨胀岩隧道施工和运营影响较大,完整通畅的隧道防排水设计体系对于膨胀岩隧道而言非常重要。

膨胀岩隧道防排水设计应遵循“以防为主,防、排、堵、截相结合”的原则,同时结合当地的气象、水文、地质条件,因地制宜地进行。大华岭隧道暗洞采用350 g/m²土工布加1.2 mm厚EVA防水板防水,环向采用 $\phi 100$ mm排水管,并在墙脚与纵向 $\phi 100$ 半边打孔PE排水管相连通,最后通过横向 $\phi 100$ PE波纹管将纵向排水管水流排入中心排水沟,从而形成完整通畅的防排水系统。同时为了便于定期清理检修,在洞内按一定间距设置了纵向管检查井和中心沟检查井。

2 结构数值模拟

大华岭隧道膨胀性围岩沿隧道轴线随机出现,且有时并不是全断面出现,给计算模型的选取造成了一定的困难。限于篇幅,考虑最差地质情况,选取岩体较破碎中等膨胀岩地段的隧道设计进行数值模拟分析。

2.1 计算理论

隧道作为地下工程,由于其结构受力分析的复杂性和不确定性,隧道的数值计算模型经历了从经验设计上升到理论分析的过程,目前应用较多的是基于连续介质理论的有限元数值模拟方法。针对膨胀性围岩隧道的力学特性以及新奥法设计的原理,该文应用弹塑性模型对膨胀性围岩隧道支护结构和施工过程进行数值模拟分析。隧道围岩变形视为弹塑性平面应变问题;隧道围岩材料特性按均质弹塑性考虑,采用 Drucker-Prager 模型的屈服准则。超前支护、初期支护、二次衬砌和仰拱回填材料的力学特性远较 V 级围岩好,计算中将其视为弹性体。对于隧道周围 $\phi 42$ 超前注浆小导管,其作用是在顶部形成加固层和起到“抬梁”的效果,以阻止隧道顶部过大的变形而造成局部坍塌,在计算中可采用释放载荷的方法来模拟其作用。

2.2 计算模型与假定

根据该隧道工程地质勘察和结构设计的实际情况,以及现有资料表明:地下洞室开挖后的围岩位移,仅在洞室周围距离洞室中心点 3~5 倍洞室开挖宽度或高度的范围内存在实际影响,在 3 倍洞室开挖宽度或者高度处的位移变化一般在 10% 以内,在 5 倍宽处的应力变化一般在 3% 以内。该文计算模型取开挖洞室中心点两侧宽度及上下部深度各取 5 倍的隧道开挖宽度,模型总宽度为 160.6 m,总高度为 117.4 m,施工按照环形导坑预留核心土开挖法,分 16 个施工步模拟开挖施工过程。

对于膨胀岩的膨胀力,随着隧道的开挖及初期支护,处于原始状态的膨胀岩被活化,活化的膨胀岩吸水产生的膨胀力部分因变形而释放,部分被初期支护承担,二次衬砌只承担少部分膨胀压力。随着时间的推移,活化的膨胀岩不可避免的会接触水而产生膨胀力,这部分膨胀力由一次衬砌和二次衬砌共同承担。此次计算膨胀力为二次衬砌支护完成后,假设膨胀岩吸水膨胀产生膨胀力,参考相关资料,取其值为 0.30 MPa。该文对膨胀力的模拟,考虑用施加外荷载法进行,膨胀力均布于初期衬砌之上,不考虑围岩体积膨胀。

在有限元数值分析中,围岩、初期支护、二次衬砌均采用二维 Plane42 单元。计算模型单元总数为 4 870,节点总数 4 933。模型的边界条件除上部为自由边界外,两边侧面和底面为法向约束边界。围岩及支护的物理力学参数见表 2。由于膨胀岩机理的不明确性,目前尚无关于膨胀岩物理力学参数的准确资料,因此对于膨胀岩的参数取值以 V 级围岩参数代替。

表 2 物理力学参数

种类	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比	粘聚 力/MPa	内摩擦 角/($^\circ$)
V 级围岩	17.00	1.50	0.4	0.10	35
一次衬砌	23.00	30.00	0.22	—	—
二次衬砌	25.00	31.00	0.20	—	—

注:一次衬砌弹模考虑钢拱架的弹模,换算公式为 $E_h' = E_h^0 + A_g E_g / A_h$,式中: E_h' 为折算后喷射混凝土的弹性模量; E_h^0 为喷射混凝土的原始弹性模量; A_h 为喷射混凝土的截面面积; E_g 为钢拱架的弹性模量; A_g 为钢拱架的截面面积。

2.3 计算结果

ANSYS 通用软件提供了两个后处理器(POST1 和 POST26),通过后处理器能够对结构各个部分的应力、应变、反力、位移、塑性区等进行分析。如果在数值分析中采用的是弹性材料则把计算得出的大、小主应力的最大或最终值与规范的容许值或极限值进行比较,判断材料是否破坏也就是:

$$\sigma \leq \sigma_{\text{容许}} \text{ (或 } \sigma_{\text{极限}} \text{)} \quad (1)$$

如果在分析中采用的是弹塑性材料,除了可以运用弹性材料的判别方法外,还可以根据结构的塑性区大小加以判断,一般认为如果塑性区超过结构厚度的 1/4 时认为结构破坏,判别公式如式(2)所示:

$$d_{\text{塑}} < d/4 \quad (2)$$

式中: $d_{\text{塑}}$ 为最大塑性区厚度; d 为对应于最大塑性区的衬砌截面厚度。

表 3 为初期支护应力随施工步的不同而变化的情况,表 4 为二次衬砌随施工步的不同而变化的情况。

经计算,初期支护第一主应力极值为 1.83 MPa,出现在隧道左侧拱脚,即上部开挖与左上侧开挖的结合处,大小超过了 C25 喷射混凝土的抗拉设计强度值,但是未超过其极限抗拉强度值,且其最终应力值并未超过抗拉设计强度值,因此可以认为结构设计是安全的;第三主应力极值为 7.43 MPa,同样出现在隧道左侧拱肩,即上部开挖与侧墙开挖的结合处,其值远远小于其设计抗压强度值。

二次衬砌第一主应力极值为 0.24 MPa,出现在仰拱中部,其值远远小于 C30 混凝土设计拉压强度值;第三主应力极值为 9.39 MPa,出现在左侧拱脚处,其值远远小于 C30 混凝土设计抗压强度,由此可以认为,二次衬砌基本满足安全储备,结构设计是安全的。围岩塑性区主要出现在右侧拱肩附近,且区域较小,对支护结构没有太大影响。

表3 一次衬砌结构计算结果

荷载步	第一主应力 σ_1			第三应力 σ_3		
	极值/MPa	主要范围/MPa	出现部位	极值/MPa	主要范围/MPa	出现部位
03 拱部一衬	0.22	-2.40~0.10	右侧拱肩	-2.57	-2.02~-0.38	右侧拱肩
04 左上开挖	0.95	0.11~0.52	左侧拱肩	-3.32	-2.55~-0.25	右侧拱肩
05 左上一衬	1.83	0.25~0.88	左侧拱肩	-3.88	-2.58~-0.83	右侧拱肩
06 右上开挖	1.04	-0.13~0.65	右侧拱肩	-3.40	-2.63~-0.71	左侧拱腰
07 右上一衬	1.73	-0.43~0.92	右侧拱肩	-3.65	-2.76~-0.52	左侧拱腰
08 核心开挖	1.72	-0.46~0.90	右侧拱肩	-3.76	-2.84~-0.54	左侧拱腰
09 左下开挖	1.18	-0.35~0.80	右侧拱肩	-3.74	-2.85~-0.62	左侧拱腰
10 左下一衬	1.38	-0.33~0.95	左侧拱腰	-3.11	-2.36~-0.50	左侧拱腰
11 右下开挖	1.65	-0.35~0.98	右侧拱肩	-3.51	-2.65~-0.93	左侧拱腰
12 右下一衬	1.51	-0.15~0.89	右侧拱肩	-3.51	-3.09~-0.53	左侧拱腰
13 仰拱开挖	1.48	-0.15~0.87	右侧拱肩	-3.55	-2.69~-0.11	左侧拱腰
14 仰拱一衬	1.47	-0.15~0.86	右侧拱肩	-3.59	-2.72~-0.12	左侧拱腰
15 模筑二衬	0.45	-0.48~0.31	左侧拱脚	-5.56	-5.07~-1.05	左侧拱肩
16 加膨胀力	1.01	-0.54~0.81	左侧拱脚	-7.43	-6.67~-2.11	左侧拱肩

表4 二次衬砌结构计算结果

荷载步	第一主应力 σ_1			第三应力 σ_3		
	极值/MPa	主要范围/MPa	出现部位	极值/MPa	主要范围/MPa	出现部位
15 模筑二衬	0.24	-0.22~0.17	仰拱中部	-3.90	-3.04~-0.44	左侧拱脚
16 加膨胀力	0.08	-0.64~0.13	左侧拱脚	-9.39	-7.31~-1.06	左侧拱脚

值得注意的是,一次衬砌应力集中部位大都是不同开挖部分的交接处。因此,一次衬砌施工中一定要保证锁脚锚杆安设数量及质量,并且严格控制钢拱架接头板的对接质量,以及拱架对接部位的喷射混凝土质量,必要时可增加喷射混凝土的厚度,尽量减少一次衬砌的应力集中现象。特别是第一主应力的集中现象,对喷射混凝土影响较大,更应引起注意。

3 膨胀岩隧道施工

3.1 膨胀岩级别的判断

在膨胀岩隧道施工过程中,裸露的岩面由于受到空气、水的作用,会造成围岩风化、吸水软化并导致膨胀。因此,尽快判定膨胀岩的膨胀性能并选择合理的膨胀岩支护方案,从而保证快速安全的施工是膨胀岩隧道施工的一个关键。鉴于大华岭隧道膨胀岩随机分布的特性,采取一种较为简洁的判断方式是十分必要

的。参考中国相关工程的判别原则,并综合考虑设计和施工要求,该项目最终确定采用以岩石的岩粉自由膨胀率(F_s)和干燥饱和吸水率(S_f)指标作为膨胀岩膨胀性的判别标准。

目前,大华岭隧道已经进入施工阶段,在大华岭隧道施工过程中洞内出现了间隔分布的膨胀岩。为此,该项目业主单位委托相关科研单位对围岩的特性做了专项试验,并提供了《岩石物理力学性质试验报告》(下称《报告》)。由于在《报告》中未提供饱和吸水率数据,因此以岩石的自由膨胀率(F_s)作为主要的判定标准。通过对《报告》中数据结果的分析,试样岩粉自由膨胀率(F_s)最大值为40%、最小值为20%,结合报告所提供的其他试验数据,初步判定大华岭隧道报告中膨胀岩岩样性质为弱膨胀岩,在施工中应按弱膨胀岩支护结构进行施工。

3.2 施工原则

在大华岭隧道膨胀岩设计方案中,提出了“加固围

岩,限制变形,先柔后刚,先放后抗,留够变形,底部加强”的施工原则。结合膨胀岩的特性,在施工过程中提出了以下注意事项:

(1) 爆破时,应短进尺、多循环,采用光面爆破。隧道周边宜采用风镐开挖,减少围岩扰动。

(2) 开挖时适当增加预留变形量,喷射混凝土及时封闭掌子面,并分层喷射。采用长锚杆加固膨胀岩,保持岩体稳定。

(3) 根据现场监控量测数据合理确定二次衬砌施做时间。

膨胀岩段隧道施工时,应特别注意水的影响并采取相应措施:

(1) 浅埋地段的地表低洼处应填平,防止地面水下渗。

(2) 在断层破碎带、节理发育地段应及时施作环向排水管,将水归入沟槽,引排至洞内水沟。

(3) 顺坡排水时,设置专门的防渗漏排水沟槽,严禁在岩体上直接挖沟排放。反坡排水时,设置完善的排水设施并保证抽排水设备的完好,严禁水渗流至开挖工作面。不要向开挖面洒水,以保持围岩干燥。

(4) 加强通风以降低洞内湿度和温度。

在大华岭隧道施工过程中,膨胀岩体除全断面分布外,部分段落出现随机分布的状态,包括隧道中部、拱部、墙部和仰拱。针对局部出现膨胀岩块的情况,采取了相应的处理措施:

(1) 对于出现在掌子面中部的膨胀岩,由于不影响隧道支护结构,按正常状态挖除即可。

(2) 对于出现在拱部边墙处的膨胀岩,采取局部加长锚杆的措施,其余部位正常施工。

(3) 对于出现在拱底、拱脚的膨胀岩,采取加长锚杆、设置仰拱和钢筋混凝土二衬的措施。

3.3 施工效果

大华岭隧道监控量测必测项目包括周边位移和拱顶下沉,在膨胀岩段增加了隧底隆起作为选测项,测量间距适当加密。监测结果表明:已完成的弱膨胀岩段结构支护效果良好,未出现初期支护侵限的现象。

4 结语

根据数值模拟结果,大华岭隧道采用环形导坑预

留核心土法开挖,按照既有的膨胀岩设计参数,隧道结构是安全的,设计是合理的。从已完工的支护结构效果来看,方案是基本安全可行的。但作为复杂的地下工程,膨胀性围岩公路隧道仍存在较多的亟待解决的难题。1) 公路隧道膨胀岩如何分类,如何在施工过程中快速有效地判别膨胀岩的膨胀特性? 2) 公路隧道尤其是山岭公路隧道,防排水结构大多为非抗水压结构,即隧道中的防水排水仍是以排为主,随着时间的推移,山岭水系的改变,原有的支护结构是否满足安全的要求? 即使现在是安全的; 3) 公路隧道结构支护主要是靠工程类比法,结构计算为辅,但完全成功的膨胀岩隧道目前仍不多。这些问题都需要在实践中摸索。

参考文献:

- [1] 崔旭,张玉. 膨胀岩的判别分级与隧洞工程[J]. 甘肃水利水电技术,2000(3).
- [2] 徐颖,何孔翔,张凤翔. 膨胀岩判别方法的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,2002(4).
- [3] 何山,朱珍德,王思敬. 膨胀岩的判别与分类方法探讨[J]. 水利水电科技进展,2006(4).
- [4] 傅仝雷,丁恒. 铁路膨胀岩隧道设计问题的探讨[J]. 西部探矿技术,2001(1).
- [5] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册(路基)[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 孙小明,武雄,何满潮,等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准[J]. 岩土力学与工程学报,2005(1).
- [7] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [8] 俞琳. 软岩隧道开挖与支护数值分析[D]. 大连理工大学硕士学位论文,2005.
- [9] 徐干成,白洪才,郑颖人. 地下工程支护结构[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [10] 周顺华. 开挖理论[M]. 北京:中国铁道出版社,1997.
- [11] 潘吕实. 隧道力学数值疗法[M]. 北京:中国铁道出版社,1995.
- [12] 徐干成,等. 地下工程支护结构[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [13] 北京科技大学. 岩石物理力学性质试验报告[R],2008.
- [14] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].