

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.027

荣乌高速营尔岭隧道排烟竖井衬砌安全性评价

徐 锋, 侯哲生, 王云隆

(烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264000)

摘 要: 营儿岭隧道排烟竖井井深 88 m, 成井直径 5.2 m, 所处地层为太古界中风化花岗片麻岩, 地质围岩级分别为 IV 级、V 级, 极易发生塌方、掉块。通过使用专业岩土软件 MIDAS/GTS NX, 模拟营儿岭隧道这种复杂地质条件下的开挖与支护过程, 总结其开挖过程中的围岩应力变化规律, 并对其衬砌支护提出优化建议。

关键词: 竖井; 开挖; 围岩应力; 衬砌支护

中图分类号: U455.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0145-04

Safety Evaluation of Shaft Lining in Yingerling Tunnel of Rongwu Expressway

XU Feng, HOU Zhesheng, WANG Yunlong

(School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: The shaft of the smoke shaft of Yingerling Tunnel is 88 m deep and the diameter of the well is 5.2 m. The stratum is the weathered granitic gneiss in the archean boundary. The geological surrounding rock grade is IV - V, which is easy to collapse and fall off. By adopting professional geotechnical software Midas GTS NX, the excavation and support process under the complex geological conditions of Yingerling Tunnel is simulated, and the variation law of surrounding rock stress during excavation is summarized, and the lining support is optimized.

Keywords: shaft; excavation; surrounding rock stress; lining support

近年来,我国公路交通事业发展迅猛,公路隧道竖井的数量随之增加,其中竖井衬砌的安全性评价显得尤为重要。本文以荣乌高速营尔岭隧道排烟竖井为例,结合其设计支护参数,采用三维岩土分析和隧道有限元软件 MIDAS/GTS NX 对周边环境 and 其施工过程进行模拟计算,依据模拟结果对其竖井施工方法和衬砌支护的安全性进行评价。

1 荣乌高速营尔岭隧道概况及竖井设计

1.1 营尔岭隧道概述

荣成一乌海高速,简称荣乌高速,荣乌高速是连接山东省荣成市和内蒙古乌海市的高速公路,全长 1 820 km。本文所选取的案例为荣乌高速河北徐水至涞源段营尔岭隧道,该隧道设计为双向六车道通行,采用分离式隧道施工的特长公路隧道,其中隧道左线长约 5 656 m,隧道右线长约 5 677.3 m。隧址区地形地貌复杂,山体走势曲折;属于丘陵地貌,剥

蚀程度较低;受隧道所处山体的自然坡度大的影响,隧道线位内相对高差达到 913 m,其中最高处标高 1 618 m,最低处标高 705 m^[1]。

隧道运营通风设计,洞内分别在 K103 + 311 和 K103 + 441 处设联络风道。联络风道内设置轴流风机,通过互补通风满足运营要求。

隧道排烟设计,考虑排烟区段较长,隧道设排烟竖井一座,设置在桩号 K104 + 439 与 K104 + 430 左右线中间处,竖井井口标高 926 m,井深 88 m,成井直径 5.20 m,最大开挖直径 6.52 m(包含 5 cm 预留变形量),距离右线出口 761 m。两隧道均设置排烟横洞与之连接。竖井正常情况下不启用,仅在火灾情况下视火灾发生的不同部位结合防灾预案正确开启来排烟,排烟区段分 4 900 m 和 800 m 两个区段排烟。

1.2 水文地质条件

竖井区地质围岩级分别为 IV 级、V 级,井口段 20 m 为 V 级围岩,井身段均为 IV 级围岩,均为太古

界中风化花岗片麻岩呈侵入接触,岩体较破碎至较完整,埋深较大以挤压破坏为主,IV级围岩,跨度5 m~10 m无自稳能力,短期内可能会导致小范围塌方事故的发生;跨度小于5 m可稳定数日至一个月。V级围岩无自稳能力,跨度小于5 m可稳定数日,该级别围岩主要分布在洞口段,中密至密实状,开挖后应及时做好衬砌,稳定周边围岩。

隧道地下水主要为基岩裂隙水,水量较小,洞内地下水出水状态为点滴状或雨淋状。

1.3 竖井结构设计及施工

竖井工程除井口部设置了单层SSm明洞衬砌外,其余地段均采用复合式衬砌;复合式衬砌是在竖井开挖完成后进行初期支护的施工,待其达到设计强度后施工二次衬砌;初期支护由系统锚杆、双层钢筋网、格栅钢架、喷射混凝土组成,一般情况下二次衬砌采用素混凝土,以方便施工,但在V级围岩以及洞口浅埋地段为了保证隧道的施工安全和整体的结构稳定性,二次衬砌使用钢筋混凝土施工。另外初期支护与二次衬砌之间铺设300 g/m²土工布、1.5 mm厚单面自粘防水板作为复合防水层。

依据新奥法原理来设计营尔岭隧道竖井的施工与衬砌支护,即充分发挥竖井围岩的自稳能力,辅以锚杆和喷射混凝土等支护手段。竖井井口段采用明挖法,设置锁扣圈,井身段的复合式衬砌参数依据现场踏勘的围岩情况、水文地质条件以及埋置深度来灵活确定。

竖井二次衬砌在初期支护完成后进行,采用自下而上翻模施工。为减少竖井基础的受力,沿竖井方向每隔20 m设置一道壁座,见图1。

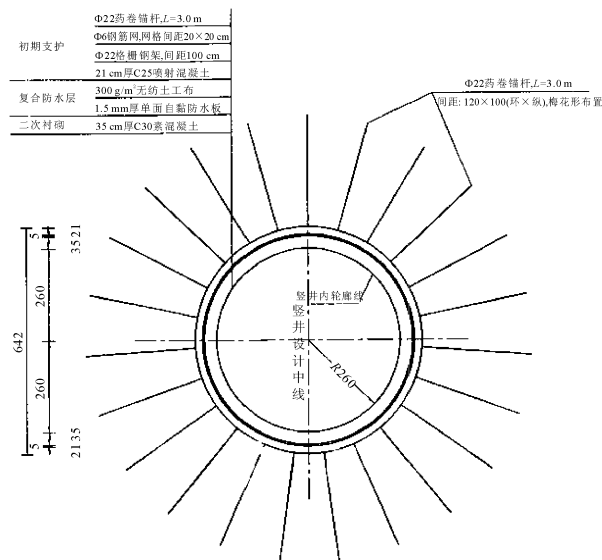


图1 竖井衬砌示意图

2 建立竖井计算模型

2.1 模型计算参数

在三维竖井模型中,使用MIDAS/GTS NX提供的实体单元来模拟地质围岩,使用板单元来模拟混凝土衬砌,使用植入式桁架来模拟锚杆。岩体本构模型为弹塑性模型,采用莫尔-库仑理论^[2-4]。岩体及材料的物理力学参数如表1所示。

表1 岩体及材料的物理力学参数

材料	E/MPa	μ	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	C/MPa	$\Phi/(^\circ)$
IV级围岩	5.0	0.32	25.0	0.60	35
V级围岩	1.5	0.40	25.0	0.15	23
衬砌	26.0	0.20	24.0	—	—
锚杆	200.0	0.30	78.5	—	—

2.2 三维计算模型范围

考虑到竖井开挖过程中不需要考虑边界以外的地质条件,所以建模时需要规定三维竖井模型的边界。一般情况下,地下工程模型建模时模型边界通常取距离洞径各方向的3D~5D。该竖井模型取竖井往外扩展5D为本模型的计算边界。竖井底部往下扩展50 m,竖井模型最终选取的尺寸为184 m×30 m×148 m。竖井三维模型见图2,有限元网格划分见图3。

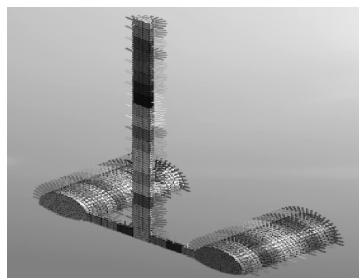


图2 竖井三维模型图

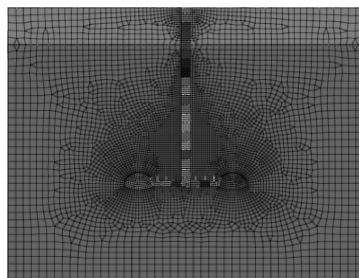


图3 有限元网格划分

2.3 定义边界条件

在三维模型模拟计算中,以整体坐标系为准,需要对模型前后左右以及底面等五个平面进行位移约束,模型顶面为地表面,是自由面,不需要添加约束。

本次三维竖井建模使用的软件是 MIDAS/GTS NX,该软件能够自动判断模型的外围区域并生成边界条件^[5-6]。

2.4 施工过程模拟

竖井主体大部分处于Ⅳ级围岩中,岩体质量相对较好,根据本工程的具体情况,拟采用反井法施工该排烟竖井。首先采用反井钻机钻 $\Phi 250$ mm 的导孔,直至导孔钻透至排烟横洞,将导孔钻头在此卸下,接上 $\Phi 1.4$ m 的扩孔钻头,再由下往上扩孔钻至井口,形成直径 1.4 m 的导井,然后正向爆破开挖,由导井溜渣至井底。出渣完成后及时进行初期支护,待全部开挖及初期支护完成后,自下而上分段翻模施工二次衬砌^[7-11]。

3 模拟结果及分析

3.1 Von Mises 应力

Von Mises 准则是冯·米塞斯于 1913 年提出的一个屈服准则。Von Mises 准则的值通常称为 Von Mises 等效应力,其考虑了第一、第二、第三主应力。一般情况下,模型内部的应力分布情况用 Von Mises 应力等值线来表示,通过分析其应力变化情况来对模型的疲劳,破坏等进行评价。

Von Mises 应力值的计算:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

其中 σ_{eff} 代表 Von Mises 应力, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别代表第一、第二、第三主应力。

在 MIDAS/GTS NX 模型后处理结果中,提供了 Von Mises 应力,Von Mises 应力表示在一定的变形条件下,当材料的单位体积形状改变的弹性位能(又称弹性形变能)达到某一数值时,材料就屈服;换言之,当单元体的形状改变比能达到一定程度,材料开始屈服。使用该准则来评价竖井初期支护的受力情况是比较适合的^[12-13]。

3.2 竖井模型初期支护的受力分析及安全性评价

竖井开挖后,初期支护所受的 Von Mises 应力如图 4~图 6 所示。

整个施工模拟过程中,最大 Von Mises 应力出现在竖井与连接横洞交界处,最大 Von Mises 应力值为 4.58 MPa,安全系数计算如下:

$$k = \frac{\sigma_R}{\max(\sigma_s)} = \frac{7.60}{4.58} = 1.66 \quad (2)$$

式中: k 表示安全系数, $\max(\sigma_s)$ 表示初支结构所受的极限抗拉力,取最大 Von Mises 应力值 4.58 MPa, σ_R 表示初支结构等效抗拉承载力,取值为 7.6 MPa^[14]。

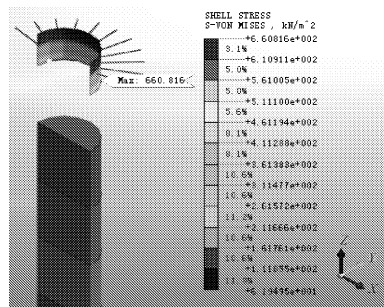


图 4 第 1 步开挖完成并进行初期支护后

Von Mises 应力图

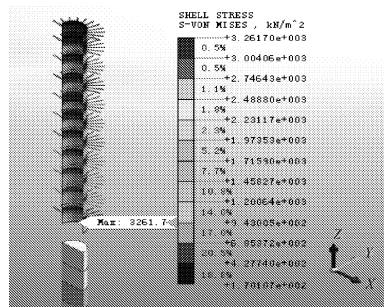


图 5 第 11 步开挖完成并进行初期支护后

Von Mises 应力图

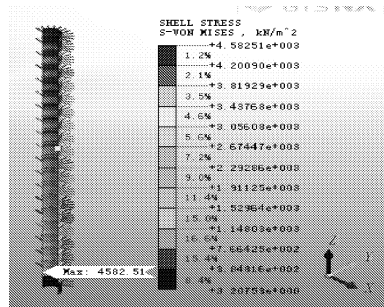


图 6 全部开挖完成并进行初期支护后

Von Mises 应力图

通过计算可知,该竖井模型初支结构的最小安全系数为 1.66,由此可得初支结构所受到的围岩应力较小,根据《公路隧道设计规范》^[15] (JTG D70—2004) 及《公路隧道设计细则》^[16] (JTG/T D70—2010),该初支结构的设计是合理可靠的。

从 Von Mises 应力图上可以看出,竖井在进行初期支护后,Von Mises 应力呈线性变化,且较为平缓;从 X 和 Y 方向来看,Von Mises 应力基本呈对称分布, Z 方向的 Von Mises 应力变化是随着竖井深度的增加呈线性增大的趋势,初支结构所承受的 Von Mises 应力最大值位于竖井深度最大处,故在开挖完成后都应及时进行初期支护,并且每个开挖循环的进尺不宜过大,防止 Von Mises 应力过大导致围岩失稳以致于上部初期支护的垮塌。

3.3 围岩稳定性分析

在 MIDAS/GTS NX 模型后处理结果中,提供了已

经进行初期支护后的围岩塑形区分布图以及位移图。

3.3.1 围岩塑性区分布情况

通过图 7 可以看出该竖井施工模拟结果中的井壁围岩没有出现塑性区,根据莫尔-库仑材料屈服准则可知,该竖井初支结构没有出现屈服情况,存在足够的安全储备,再一次说明该初支结构的设计是安全可靠的。

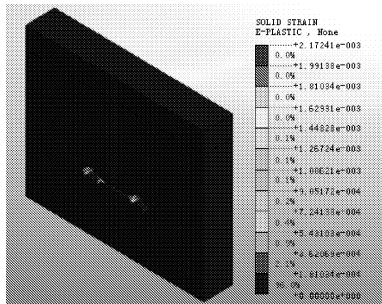


图 7 等效塑性应变分布图

竖井的开挖使得原先主要承受上部土体压力的井底掌子面出现应力重分布现象,应力释放导致井底掌子面发生上拱,产生拉应力,故每个开挖循环的井底掌子面都会发生应力集中现象,如图 8 所示,应力集中现象随着竖井开挖深度的增大而越发的明显。

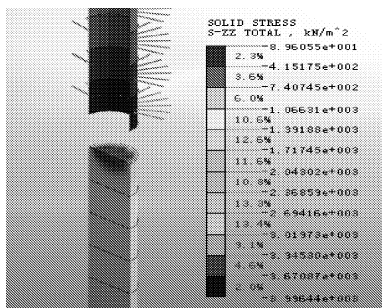


图 8 井底应力集中现象

3.3.2 围岩位移场情况分析

竖井开挖完成后的整体位移较小,且以竖井中轴线为中心,两边位移呈对称分布,如图 9 所示。

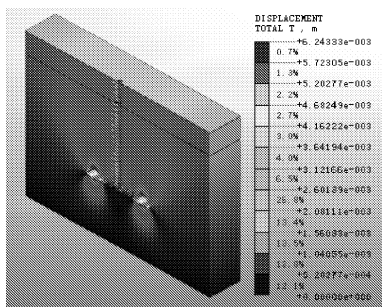


图 9 竖井整体位移

竖井围岩在初支结构的约束下,位移和应力值均满足结构安全性的要求,竖井的整体稳定性也满足要求。

4 结论

(1) 从 Von Mises 应力图上可以看出,竖井的围岩应力是随着开挖深度的增加而逐渐增大的,故初期支护应紧随开挖进度,并且每隔一段距离应设置一个壁座,竖井上部 20 m 所处位置是 V 级围岩,故壁座所隔距离应相应的减小。

(2) 在整个竖井模拟施工过程中,每一开挖循环结束时,井底都出现了应力集中现象,并且随着开挖深度的增加而越发明显,剪应力也随之增大,所以开挖结束后应加强掌子面处井壁的支护,尽快进行初期衬砌。

(3) 竖井与连接横洞交界处是高应力聚集区,所以在结构设计中应进行加强处理,保证交界处存在足够的安全储备,竖井施工完成后应及时进行该处的二次衬砌。

参考文献:

- [1] 顾洋. 浅埋大跨度公路隧道软弱围岩段集中坍塌原因分析及处置措施研究[D]. 烟台:烟台大学,2017.
- [2] 史彦文,韩常领,董溥. 秦岭终南山特长隧道竖井衬砌的数值计算[J]. 公路,2007(12):214-217.
- [3] 王仲仁,胡卫龙,胡蓝. 屈服准则与塑性应力-应变关系理论及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2014.
- [4] 陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [5] 苏巧金. 大跨径超深竖井施工过程中围岩支护效果的数值研究[J]. 福建交通科技,2012(3):47-52.
- [6] 北京迈达斯技术有限责任公司. MIDAS 理论指南[Z]. 北京:北京迈达斯技术有限责任公司,2005.
- [7] 王海涛. MIDAS/GTS 岩土工程数值分析与设计[M]. 大连:大连理工大学出版社,2013.
- [8] 刘全鹏,赵宁,等. 坪头水电站 1# 竖井的开挖与支护[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(1):25-30.
- [9] 宋旭亮,徐娇. 新奥法在超深竖井施工中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(1):148-150.
- [10] 刘志强. 反井钻井法施工特长公路隧道的通风竖井[J]. 公路,2007(4):208-211.
- [11] 阮翔. 特长公路隧道通风斜井开挖和衬砌施工的关键技术[J]. 铁道建筑,2015(11):43-46.
- [12] 李云安,葛修润,等. 岩-土-混凝土破坏准则及其强度参数估算[J]. 岩土力学与工程学报,2004,23(5):770-776.
- [13] 夏曼力. 基于 MIDAS 的施工过程分析[J]. 施工技术,2017(1):150,245.
- [14] 刘洋,李奕男. 深竖井支护结构设计方法及安全性分析[J]. 门窗,2017(1):251-252.
- [15] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范: JTG D70—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [16] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计细则: JTG/T D70—2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010.