

文章编号:1673-9469(2011)03-0026-05

不同断面形式深埋巷道围岩破坏数值模拟分析

冯海英,刘德乾,赵鹏燕

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:以Ⅲ级围岩为例,利用有限差分软件 FLAC 对不同埋深情况下不同断面形式的巷道进行数值模拟,分析矩形、直墙拱形和圆形断面巷道围岩应力应变、围岩塑性区随埋深的变化规律及特点。结果表明:拱形断面巷道的围岩变形、围岩塑性区最小,尤其是顶板下沉量较矩形和圆形断面巷道的要小得多;圆形断面巷道围岩水平向位移最小;矩形断面巷道围岩应力及变形随埋深增加幅度都要大于拱形和圆形断面巷道。

关键词:深埋巷道;断面形式;数值模拟;围岩应力;围岩变形;塑性区

中图分类号: TD31

文献标识码: A

Simulation analysis of surrounding rock damage for deep - buried roadway with different cross - sections

FENG Hai-ying, LIU De-qian, ZHAO Peng-yan

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: The roadways in the rock of Grade Ⅲ of different cross - sections in different buried depths were simulated with the finite difference software FLAC, and the stress - strain behaviors of rock, the rules of the plastic zone changing with the buried depth of the roadways with rectangular, vertical wall - arch and circular cross - section were analyzed respectively. The results show that both the surrounding rock deformation and plastic zone of the roadway with the vertical wall - arch cross - section are the smallest, the roof settlement is also less than that of the roadway with rectangular and circular cross - section; the surrounding rock's horizontal displacement of roadway with the circular cross - section is the smallest; as to the contents of the stress - strain increasing with the buried depth, the roadways with rectangular cross - section is better than the roadways with vertical wall - arch and circular cross - section.

Key words: deep - buried roadway; cross - section deform; simulation; surrounding rock stress; surrounding rock deformation; plastic zone

随着我国煤矿矿井开采深度的增加,原岩应力与构造应力不断升高,岩体稳定性差、工程地质条件复杂,巷道围岩变形量显著增大、变形速度快,巷道返修率高,因此,掌握深部巷道围岩破坏机理及影响因素,解决深部巷道支护设计中存在的诸多问题,寻求合理的支护设计理论与方法,无论对工程设计还是工程施工都具有重要的指导意义^[1-2]。影响深部巷道围岩稳定的因素很多,其中巷道围岩岩性、地质构造、地应力、巷道埋深、巷道断面形式是使围岩失稳的主要因素^[3-5],刘文清^[6]

论述了巷道断面的确定过程,从施工、使用这两个方面确定了巷道断面的造型及尺寸;周小平^[7]运用有限元软件,对各类拱形深埋单轨和双轨巷道进行了数值分析,分析结果表明单轨巷道宜采用1/4圆拱断面,双轨巷道宜采用1/4圆拱或三心拱断面。

浅埋巷道构造应力的影响很小,可以只考虑自重应力,随着巷道埋深的增加,构造应力在地应力中的比重逐渐增大,因此,深埋巷道必须要考虑

收稿日期:2011-04-22

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2010001012) 特约专稿

作者简介:冯海英(1973-)女,河北临漳人,讲师,从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

构造应力的影响,罗文超^[8]基于淮南矿务局潘一矿的水压致裂法地应力测试结果及围岩应力分布特征的研究,认为深埋巷道围岩应力分布特征与传统的浅埋巷道差别明显;孙玉福^[9]采用理论分析方法研究了巷道布置与地应力场的关系,利用数值模方法分析了不同的巷道轴线与最大水平主应力夹角情况时,巷道围岩应力分布与变形特征,并通过实际工程地应力测量,验证了理论分析的正确性。本文在考虑构造应力作用下,利用有限差分软件 FLAC 对不同埋深作用下不同断面形式巷道围岩应力应变特性及塑性区分布进行数值模拟分析,从而总结各断面形式巷道的围岩应力应变分布规律和围岩破坏范围的大小,从而为工程设计及施工提供指导。

1 巷道深、浅埋分界线的确定

1.1 围岩压力的计算

矿山法是根据大量的隧(巷)道施工塌方资料进行统计分析,提出了一种确定隧(巷)道围岩竖向均布压力线:

$$q = 0.45 \times 2^{s-1} \times [1 + i(B+5)]r \quad (1)$$

式中, q —围岩竖向均布压力, kN/m^2 ; s —围岩级别; B —巷道宽度; i —以 B 每增加 1m 时围岩应力增加率; r —围岩重度, kN/m^3 。

1.2 荷载等效深度

$$h_p = \frac{q}{r} \quad (2)$$

式中 q —用矿山法计算出的围岩竖向压力, kN/m^2 。

1.3 浅、深埋隧(巷)道分界深度

$$H_p = (2 \sim 2.5) h_p \quad (3)$$

采用矿山法施工时, VI ~ V 围岩取 $H_p = 2.5 h_p$, I ~ III 级围岩取 $H_p = 2 h_p$ 。

2 构造应力的确定

对于深埋巷道,只考虑自重应力的影响,与实际情况并不相符。目前,岩体的构造应力尚无法用数学力学的方法计算描述,而只能采用现场测量的方法得到,蔡美峰等^[10]根据对新城金矿地应力的测试结果拟合出地应力的近似计算公式如下:

(1) 250 m 以上地应力计算公式

$$\sigma_{h_{\max}} = -0.02 + 0.056 7H (\text{MPa}) \quad (4)$$

$$\sigma_{h_{\min}} = -0.14 + 0.030 1H (\text{MPa}) \quad (5)$$

$$\sigma_v = 0.01 + 0.027 3H (\text{MPa}) \quad (6)$$

(2) 250 m 以下地应力计算公式

$$\sigma_{h_{\max}} = -11.18 + 0.096 7H (\text{MPa}) \quad (7)$$

$$\sigma_{h_{\min}} = 1.99 + 0.020 8H (\text{MPa}) \quad (8)$$

$$\sigma_v = -3.64 + 0.042 3H (\text{MPa}) \quad (9)$$

式中 $\sigma_{h_{\max}}$ —最大水平主应力; $\sigma_{h_{\min}}$ —最小水平主应力; σ_v —垂直应力; H —测点埋深。

3 计算模型及参数选取

本文算例以 III 级围岩进行计算分析,对不同埋深下不同巷道断面形式的围岩应力、围岩变形及围岩塑性状态进行分析,得出不同埋深下不同断面形式巷道的应力及变形特性,以期对巷道的设计及施工提供指导。以 III 级围岩为例,根据矿山法可计算深、浅埋分界深度: $H_p = 19.44 \text{ m}$,所以巷道埋深超过 20 m,即可认为深埋巷道。为便于比较,取 3 种断面形式的巷道等效宽度 $B = 3.5 \text{ m}$,断面形式及尺寸如图 1 所示。根据实际的工程地质情况,所选巷道模型两侧限制 x 方向位移,底部限制 x 和 y 方向上的位移,埋深超过 25 m 时,以荷载模拟上部岩层作用到模型顶部,所选力学计算模型如图 2 所示,作用在模型顶部上的荷载如表 1 所示。为了对比不同断面形式在不同埋深下的应力应变特性,去除其它因素的影响,应选取单一材料参数,其材料参数见表 2。

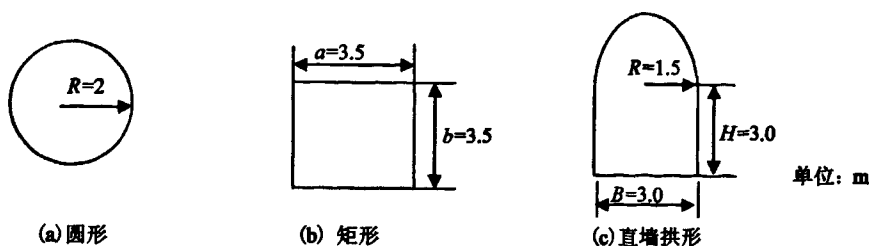


图1 不同巷道断面形式示意图

Fig.1 Schematic diagram of roadway with different cross-sections

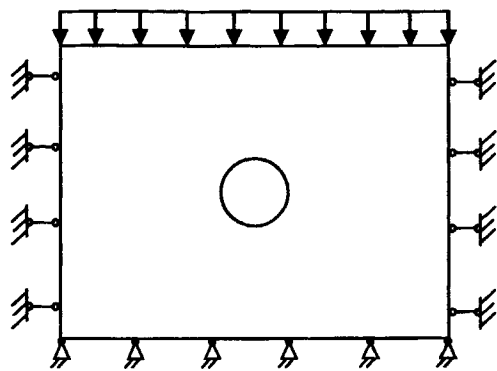


图2 力学计算模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of mechanics model

表 1 巷道不同埋深时作用在模型顶部的荷载
Tab.1 Different buried depth of tunnel the load at the top of the model

巷道埋深 /m	竖向应力 /MPa	最大水平应 力/Mpa	最小水平主 应力/MPa
25	6.93E-01	1.40E+00	6.13E-01
50	1.38E+00	2.82E+00	1.37E+00
100	2.74E+00	5.65E+00	2.87E+00
150	4.11E+00	8.49E+00	4.38E+00
100	2.74E+00	1.13E+01	2.87E+00
250	6.84E+00	1.42E+01	7.39E+00
300	8.20E+00	1.70E+01	8.89E+00
350	9.57E+00	1.98E+01	1.04E+01
400	1.09E+01	2.27E+01	1.19E+01

表 2 Ⅲ级围岩计算模型材料参数
Tab.2 Model material parameters of class III surrounding rock

岩 石	密度 /(kg·m ³)	弹性 模量 /GPa	泊松 比	内聚力 /MPa	内摩 擦角 /(°)	抗拉 强度 /MPa
页岩	2 400	10.7	0.25	1.1	44	0.5

4 数值模拟结果及分析

4.1 围岩应力分析

不同断面形式的巷道在不同埋深下围岩的最大水平应力如图 3 所示。由图可知,拱形和矩形巷道断面由于有尖角存在,易产生应力集中现象,使得水平应力值要高于圆形断面巷道围岩水平应力值,矩形、拱形和圆形断面巷道的最大水平应力分别为 7 MPa、7 MPa 和 5 MPa,圆形断面巷道最大水平应力约为矩形或拱形巷道最大水平应力的

71%,并且拱形和矩形断面巷道在不同埋深时的最大水平应力值几乎一样,所不同的是,矩形巷道最大水平应力在四个边角分布,而拱形巷道的最大水平应力分布在直墙的两个底角处。

对于不同断面形式的巷道,虽然最大水平应力随断面形式的不同而不同,但是最大竖向应力的分布与巷道断面形式关系不大,这一点正好与构造应力主要影响围岩水平向应力的原理相一致,图 4 为不同断面巷道围岩的最大竖向应力,其最大竖向应力约为 20 MPa。

4.2 围岩位移分析

图 5 为不同断面形式的巷道两帮的位移随埋深的变化,分析不同断面巷道水平位移随埋深的变化曲线可知:(1)巷道两帮水平位移随埋深的增加而增大,但是不同断面巷道增加的幅度不同,其中矩形断面巷道增幅最大,拱形断面增加幅度最小,圆形巷道居中;(2)同一埋深情况下,矩形断面巷道围岩竖向位移最大,拱形最小,圆形居中,以埋深 200 m 为例,矩形巷道围岩最大竖向位移为 50 mm,圆形巷道围岩最大竖向位移为 20 mm,拱形断面巷道围岩最大竖向位移只有 10 mm,仅是矩形断面巷道的 1/5,由于拱形巷道顶板可形成拱的作用,两侧直墙具有支撑作用,所以其竖向位移最小,从竖向变形角度考虑,巷道选择拱形断面较好。

拱形断面巷道由于直墙的存在,大大降低了竖向位移量,但是与此同时巷道的水平位移增大,如图 6,拱形断面与矩形断面的最大水平位移基本相同,圆形断面巷道围岩水平位移最小。矩形或拱形断面巷道围岩最大水平位移均为 20 mm,圆形巷道断面围岩最大水平位移为 7.5 mm,而且矩形和拱形断面水平位移增加幅度要比圆形断面巷道大得多。

4.3 围岩破坏状态分析

图 7 为不同断面巷道在埋深 400 m 时的围岩塑性状态分布,分析围岩塑性区分布可得,矩形断面巷道围岩塑性屈服区域最大(包括受拉屈服和和受剪屈服),在巷道周边均有分布,拱形巷道围岩破坏区域最小,圆形断面巷道围岩塑性区破坏区居中,且主要为受剪破坏。并且各断面围岩塑性区均随埋深的增加而增大,表 3 列出了埋深 400 m 时不同断面形式巷道围岩的塑性区破坏深度。

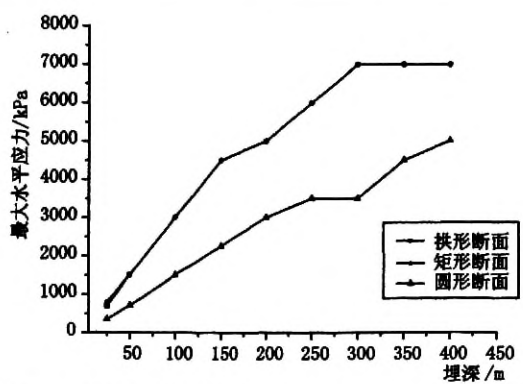


图3 不同断面巷道围岩最大水平应力随埋深变化曲线
Fig.3 Maximum horizontal stress curve changing with the depth of different sections of roadway surrounding rock

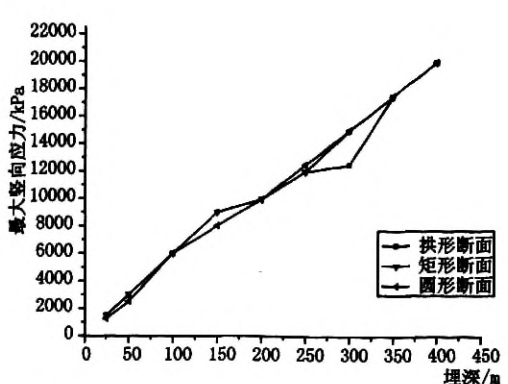


图4 不同断面巷道围岩最大竖向应力随埋深变化曲线
Fig.4 Maximum vertical stress curve changing with the depth of different sections of roadway surrounding rock

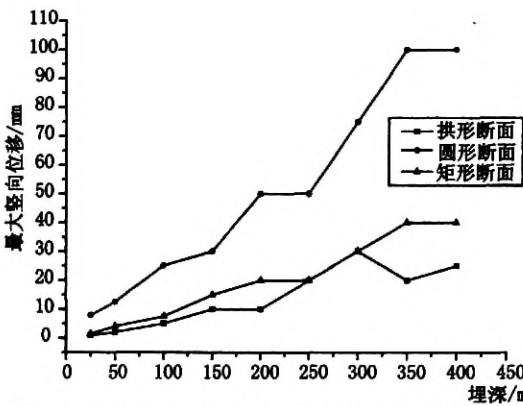


图5 不同断面巷道围岩最大竖向位移随埋深变化曲线
Fig.5 Maximum vertical displacement curve changing with the depth of different sections of roadway surrounding rock

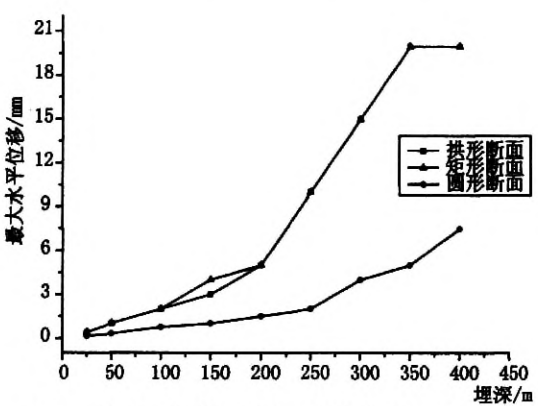
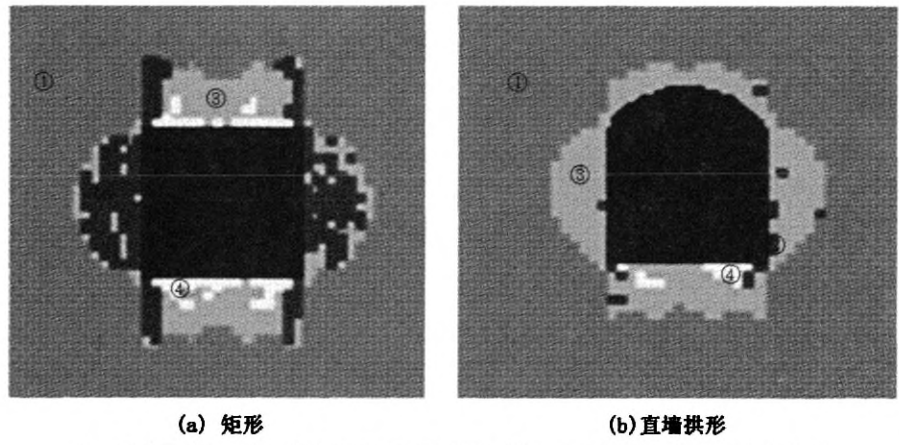


图6 不同断面巷道围岩水平向位移随埋深变化曲线
Fig.6 Maximum horizontal displacement curve changing with the depth of different sections of roadway surrounding rock



注: ①表示弹性状态; ②表示受剪屈服状态; ③表示受拉状态; ④表示塑性状态

图7 巷道埋深400 m时围岩塑性区分布
Fig.7 Surrounding rock plastic zone distribution in 400m depth of the roadway

表3 不同断面形式巷道围岩塑性区深度

Tab.3 Different sections of roadway surrounding rock plastic zone depth m

巷道断面形式	两帮塑性区深度	顶板塑性区深度	底板塑性区深度
矩形	1.5	1.8	1.4
拱形	1.2	0.6	1.0
圆形	1.4	0.8	1.0

5 结论

1)对于深埋巷道,巷道围岩最大竖向应力与巷道断面形式无关,拱形和矩形断面巷道的最大水平位移均比圆形巷道的大,但随着埋深的增加,最大水平应力增幅越来越小。

2)不同埋深时,不同断面形式的巷道,围岩变形不同。矩形断面巷道无论是两帮还是顶、底板变形都很大,拱形断面巷道直墙水平变形较大,但顶板下沉量很小,建议在实际工程中,最好使用直墙半圆拱断面形式的巷道,但要重点监测巷道两帮的变形,加强两帮的支护结构。

3)不同断面形式巷道围岩塑性区分布不同。矩形断面巷道围岩塑性区范围最大,顶板塑性区最大深度可达 1.8 m;圆形巷道围岩多为受剪屈服,而且最大塑性区深度出现在上帮,约为 1.4 m;拱形断面巷道围岩塑性区最小,两帮的塑性区较

顶、底板偏大。

参考文献:

- [1] 何满朝,孙晓明.中国煤炭软岩巷道工程支护技术与施工指南[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 常聚才,谢广祥.深部巷道围岩力学特征及其稳定性控制[J].煤炭学报,2009,37(7):881-886.
- [3] 文志杰,申玉兰.深井巷道围岩稳定性影响因素分析[J].煤矿安全,2009(12):101-103.
- [4] 刘德乾,姜振泉,李建硕,等.深埋煤层开采的离心模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增2):3909-3913.
- [5] 郭延华,李良红,张增祥,等.内错式下分层回采巷道围岩变形破坏机理研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2007,24(2):21-29.
- [6] 刘文清.论巷道断面的确定方法[J].煤炭工程,2009(2):11-14.
- [7] 周小平,徐小敏,卢萍,等.深埋巷道的选型分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增1):2700-2707.
- [8] 罗超文,李海波,刘亚群.深埋巷道地应力测量及围岩应力分布特征研究[J].岩石力学与工程学报,2010,28(增2):1419-1423.
- [9] 靖洪文,李元海,许国安.深埋巷道围岩稳定性分析与控制技术研究[J].岩土力学,2005,26(6):877-881.
- [10] 蔡美峰,乔兰.新城金矿地应力场测量及其分布规律研究[J].有色金属,2000,52(8):1-6.

(责任编辑 马立)