工程因素对围岩稳定性影响三维数值模拟分析

凌标灿 彭苏萍

(华北科技学院安全科学与技术研究所 燕郊 065201)

(中国矿业大学北京研究生院 北京 100083)

摘 要 结合某地下工程实际,运用 H.AC^{DD}模拟了巷道断面形状、开挖面距离以及开挖顺序对巷道围岩稳定性的影响,并模 拟了围岩深部多点位移规律。结果表明,相同围岩条件下,不同断面形状其力学效应不同,同一断面在不同围岩条件下变形 不一样;围岩水平位移曲线随开挖面的距离呈"S'形,围岩水平最大位移主要发生在距开挖面后方2倍巷道长径的范围内; 级围岩深部位移影响范围约2.8~4.3m,级围岩影响范围6.9~7.8m;对较大断面,分步开挖有利于围岩控制。 关键词 工程因素 围岩稳定性 三维数值模拟 中图分类号:TU457 **文献标识码**:A

3D NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF THE EFFECT OF ENGI-NEERING FACTORS ON THE STABILITY OF SURROUNDING ROCK

LING Biaocan PENG Suping

(Facility of Safety Science and Technology NCIST, Yanjiao 065201)

(Beijing Graduation Institute CUMT, Beijing 100083)

Abstract The effect of cross - section shape of roadway of distance of working face, sequence of excavation on the star bility of surrounding rock, and displacement of many sites in deep part of surrounding rock are simulated with H_AC^{3D} in some engineering practice. The result shows that there are different mechanical effect with different cross - section shape of roadway under the same condition of surrounding rock, different deformation of different surrounding rocks, appeared on the same cross - section and the curve of horizontal displacement of surrounding rock is "s "- shaped with distance from working face. A maximum horizontal displacement of surrounding rock mainly occurs in a range of double diameters of the roadway in the rear of working face. The range of displacement of deep part of - grade surrounding rock is about $2.6 \sim 4.3$ m and that of - grade surrounding rock is $6.9 \sim 7.8$ m. For larger cross - section of roadway in - steps an excavation is beneficial to control on surrounding rock.

Key words Engineering factors, Surrounding rock stability, 3D numerical simulation

岩体由结构体和结构面组成,工程岩体力学行

为不仅取决于结构体和结构面的力学性质,还与赋 存环境因素及工程因素有关。自从 20 世纪 90 年代 初工程岩体力学的概念被提出后,结合赋存环境因 素、工程因素评价围岩稳定性的工作就陆陆续续有

* 收稿日期:2003 - 04 - 03;收到修改稿日期:2003 - 06 - 17.
 基金项目:国家杰出青年基金(批准号:50025413)和华北科技学院校内基金(N2002 - 15)资助.
 第一作者简介:凌标灿(1966 -),男,博士,高工,工程地质专业.Email:lingbc@ncist.edu.cn.

¹ 引 言

学者进行研究,文献[1]主要针对永久性或半永久性 的地下工程提出了复杂条件下围岩稳定性与岩体动 态施工力学,文献[2]研究了地下矿山工程围岩稳定 性模糊动态聚类分区,文献[3]提出了巷道围岩的动 态工程分类,文献[4]对采场顶板稳定性进行了神经 网络动态工程评价及控制研究。但工程岩体存在边 界不确定性、结构不确定性、功能与结果不确定性 等^[5],不同地质条件下不同工程的围岩稳定性工作 仍需进行研究,不能生搬硬套。单独研究工程因素 对围岩稳定性影响方面报道较少,本文根据某地下 工程的实际,运用 HAC^{3D}模拟工程因素对巷道围岩 稳定性的影响。

2 模型及条件

-7

本次选取直墙拱、直墙仰拱、曲墙仰拱三类巷 道,均为毛巷道,直墙拱巷道尺寸为4.2 ×5.2m及5 ×6m 二种,直墙仰拱巷道尺寸为6 ×7m,曲墙仰拱 巷道尺寸为7 ×8m,围岩分别为 级、级、级三 种,计算中选用莫尔 - 库仑模型。力学边界采用底 边固定,侧面及顶面分别施加力,结合某工程实际, 取 xx = 6MPa、yy = 4MPa、z = 4MPa, y方向平行 巷道轴线, x方向垂直巷道轴线。

在岩体工程稳定性分析中,力学参数选取将对 计算结果产生很大的影响,本次计算模型力学参数 根据某工程现场位移反分析所得结果,并参考岩块 试验力学参数,选取工程岩体力学参数如表1。

表1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass					
岩体分级					
抗压强度/MPa	28	13	4.2		
弹性模量/ GPa	10.3	4.5	0.9		
泊松比	0.29	0.36	0.41		
体积模量/ GPa	8.17	5.36	1.67		
剪切模量/ GPa	4.0	1.65	0.32		
内聚力/MPa	1.2	0.5	0.15		
内摩擦角/()	42	36	20		
抗拉强度/MPa	1.68	0.78	0.25		

3 模拟结果分析

3.1 不同断面形态力学效应^[6]

针对工程中出现的不同岩体级别,为使支护做 到经济技术合理,对 级、级、级三种围岩,设计 了直墙拱、直墙仰拱、曲墙仰拱三种基本巷道形状。 对 级、级岩体三种基本形状均模拟,级岩体用 直墙仰拱及曲墙仰拱(图1)。



从模拟结果可以看出(图1),在同一围岩情况 下,三种断面中最大主应力值相差较大,从大到小是 直墙拱、直墙仰拱、曲墙仰拱:塑性区分布范围及位 移量大小也有相似的结果,说明三种断面形状对围 岩的适应由好到差为曲墙仰拱、直墙仰拱、直墙拱。 如在 级围岩中,塑性区以直墙拱最大,尤其是底板 塑性区深度达到 1.5m,是另两种断面形状塑性区深 度的3倍。从受力状况看,三种形状断面中直墙拱 最差,但从经济技术合理及施工工艺考虑,该形状的 巷道支护对三级围岩是合适的。在 级岩体中,三 种形状的巷道最大水平位移及垂直位移基本上一 样。

对 级岩体,三种形状断面的巷道塑性区深度 均明显增加,相比较而言,直墙拱巷道塑性区范围最 大,底板达到 2.5m,巷道成型后,随着时间的推移, 底板存在较明显的底鼓,因此对有车辆运行的巷道, 可不选此种断面形状,而对底板要求不严的巷道可 考虑使用此巷道断面。直墙仰拱、曲墙仰拱两种断 面形状,顶、底塑性区分布范围一样,而侧墙塑性区 则曲墙仰拱坑道更小些,位移量差不多。因此从施 工工艺上考虑,直墙仰拱比曲墙仰较为简单,在\级 岩体中主要巷道新面形状应优先考虑官墙仰拱,次 要巷道优先选用旗墙拱断面。

对于同一种断面形状的巷道,在不同岩体中,其 最大主应力、塑性区范围及巷道变形量差异很大,开 挖后应力集中、位移和塑性区范围从大到小为, 级 围岩 > 级围岩 > 级围岩。对不同岩体地层控 制途径应与之相适应,这种定量分析将为以后的支 护提供定量依据。

3.2 围岩动态位移特征

巷道掘进时,围岩的变形规律不仅与埋深、洞 形、断面尺寸和工程地质条件等有关,还与施工过程 有关(图 2)。通过模拟试验、研究区 级、 级围岩 在距开挖面2倍洞径时开起起动,但变形量很小,不 足2%,当开挖面到测点距离达到0.5倍洞径时,变 形量开始增大,到开挖面时,水平位移量分别占约 45%、40%。当开挖面过测点分别为0.47、0.64倍 洞径时, 位移量已占总位移量的 80 %, 当开挖面过 测点距离为2倍洞径时,水平位移已基本趋于最大 值(图 2)。开挖面到测点距离 L 与洞径 D 的比值 x 与侧墙水平位移量百分比 S 可表示为下述的三次多 项式:

级岩体



图 2 巷道位移随开挖面距离的变化

Fig. 2 Change of horizontal displacement with distance from working face

 $0.1854 x^{3} + 0.7682 x^{2} + 1.0071 x + 0.4478$ $(-2.02\ 7\ x\ 7\ 0.12, r=1)$ *S* = $S = 0.1488\ln(x) + 0.9117$ (0.12 < x 7 2.26, r = 0.985)级岩体 0. $1851x^3 + 0.6612x^2 + 0.8807x + 0.4045$ $(-2.02\ 7\ x\ 7\ 0.12, r=1)$ *S* = $S = 0.1653\ln(x) + 0.8735$ (0.12 < x 7 2.26, r = 0.999)

模拟试验计算 级岩体、级岩体的边墙空间 效应系数 分别为 0.448、0.404,与国内天荒坪抽水 蓄能站试验洞实测值 值为 0.43~0.53,龙滩水电 站直墙拱形试验洞边墙的 值为 0.40~0.50 很接 近[2]。

3.3 巷道深部围岩位移

对直墙拱围岩深部多点位移进行了模拟,布置 二条测线,拱顶一条为测线1,总长8,4m(图3),直 墙中点为测线 2, 总长 9.61m(图 4)。二条测线均设 8个测点,各测点到洞壁的距离及测点位移量如表 2.

从表 2 及图 3、图 4 可知, 级围岩深部位移影 响范围约 2.8~4.3m. 级围岩影响范围 6.9~7.8 m。对 级围岩,拱顶塑性区深度约2.6m,深部位移 量百分比 S 与到洞壁距离 L 的关系式为

 $S = -0.0135L^3 + 0.2434L^2 - 1.3169L + 2.0345$

(R = 0.978)

直墙中部塑性区深度 4m,中点位移 S = L 的关 系式为

 $S = -0.0159L^3 + 0.2646L^2 - 1.3559L + 2.1149,$

(R = 0.992)

对 级围岩,则拱顶塑性区深底达 7.8m,深部

各点 S 与L 的关系式为

 $S = -0.0183L^{3} + 0.3639L^{2} - 2.3414L + 5.0115,$ (R = 0.996) $S = -0.027L^{3} + 0.4918L^{2} - 2.9032L + 5.6648,$ (R = 0.999)

直墙直墙中部塑性区深度 7.7m,中点位移 s 与

表 2 各测点位置及位移量 Table 2 Location and displacement of measurement sites

L 的关系式为

测线	围岩	1#点	2#点	3 # 点	4#点	5 # 点	6#点	7 # 点	8#点
1	位置 / m	0	0.73	1.60	2.65	3.90	5.40	6.90	8.40
	级/mm	2.23	1.02	0.3	0.05	0			
	级/mm	5.23	3.25	1.96	1.12	0.43	0.16	0.06	0
2	位置 / m	0	0.72	1.61	2.68	4.0	5.87	7.74	9.61
	级/mm	2.12	1.24	0.41	0.1	0.06	0		
	级/ mm	5.51	3.73	2.02	1.01	0.3	0.1	0.05	0







图 4 测线 2 多点位移曲线



3.4 开挖顺序对巷道围岩稳定性的影响

开挖过程中不断形成新的工作面,时空不断变 化,每一个工作面与已形成的空间相互发生影响。 对较大断面分次开挖成型时,每一个开挖分期对应 一个短期洞型。由于在开挖时期不断变化着的洞型 和加载方式,不仅影响了施工期内围岩的应力、破损 区、洞周位移,而且影响洞体成型后的应力分布,破 损区大小以及洞周位移状况。为对比分步开挖对巷 道的影响,模拟了直墙仰拱巷道分三步开挖成型的 模型。巷道宽7m,直墙高6m,顶、底拱高各2.5m,第 一步开挖上拱高2.5m,第二步开挖直墙部分,第三 步开挖下拱,每次开挖完后进行临时锚杆支护,拱 顶、底锚杆长度2.5m,杆体直径 ϕ 22mm,侧墙锚杆长 度1.6m,杆体直径 ϕ 20mm,帮、顶、底锚杆均端锚,采 用树脂药圈,分次开挖超前距离不少于30m。

表 3 不同开挖状态围岩变形情况

Table 3 Deformation of surrounding rock

under	different	excavations
anaci	anicicia	oneu runon

开挖状态	最大	锚杆受 力情况/ kN	塑性区分布/m			位移量/mm		
	土心刀/ MPa		顶部	底部	帮部	顶部	底部	帮部
第一步	8.75	30.61	1.0	1.2	0.6	10.44	0.75	3.85
第二步	10.92	59.67	2.1	2.1	1.4	14.10	8.85	15.38
第三步	11.53	69.45	2.1	2.1	2.1	14.96	3.87	18.68
整体开挖	11.60		2.1	2.1	2.1	13.42	5.0	18.12

从模拟结果(表 3)看,第一步开挖后,围岩位移 以垂直位移为主,垂直位移量是水平位移量的3倍。 最大主要集中在拱脚处,临时支护的锚杆,顶部区锚 杆受压,两侧锚杆受拉,锚杆轴向最大压应力为30.6 kN。第二步开挖后,由于垂直方向的空间扩大,使得 水平位移与垂直位移相差无几。最大主应力明显增 加,达10.92MPa,应力集中系数1.82。不管是拱顶 处锚杆还是侧墙锚杆均受压,轴向最大压应力达 59.67kN。第三步开挖时,已开挖部分在上拱脚处塑 性区进一步扩大,由第二步开挖时的1.2m增加到2. 1m,直墙上半部基本未变化,下半部塑性区由第二步 开挖时的1.4m扩大到2.1m,底拱及拱脚处塑性区 也达2.1m。因巷道高度比宽度大,三步开挖完后, 水平位移量绝对值大于垂直位移量。垂直方向巷道 相对收敛率为0.171%,水平方向相对收敛率为0. 534%。最大主应力为11.53MPa。洞周锚杆均受压, 杆体轴向最大压应力为69.54kN。

洞体一次开挖成型时,与第三步开挖完相比,塑 性区分布范围一样,侧墙水平位移有所减小,拱顶垂 直位移也有所降低,而底板位移有所升高,垂直方向 巷道相对收敛率为0.167%,水平方向相对收敛率为 0.518%。

通过对比,可以看出,分次开挖时,开挖过程中, 应力集中系数、塑性区范围及位移量大小均大幅降低,这对围岩条件较差时可以进行有效控制,防止围 岩恶化。

4 结 论

通过上述分析,可得出如下的结论。

(1)不同的巷道断面形状其力学效应不同,在某种特定的工程地质条件下,可根据工程重要性、使用年限、经济条件及不同形状的力学效应,合理选择断面尺寸及形状。

(2) 巷道围岩初期变形主要集中在开挖面前后 2 倍洞径的范围内,当开挖面过测点分别为 0.47、0.64 倍洞径时,位移量已占总位移量的 80 %。

(3)不同围岩深部位移差相较大, 级围岩,拱 顶塑性区深度约 2.8m,而 级围岩,则拱顶塑性区 深度达 7.8m,各测点深部位移量百分比 *s* 与到硐壁 距离*L* 的关系式为三次多项式 *s* = *aL*³ + *bL*² + *cL* + *d*。 (4) 硐室较大时,分步开挖有利于围岩控制。分 次开挖时开挖过程中,应力集中系数、塑性区范围及 位移量大小均大幅降低,这对围岩条件较差时可以 进行有效控制,防止围岩恶化。但最后成型时硐室 一次开挖成型与分步开挖成型相比,应力集中系数、 塑性区范围及位移量大小基本一致。

参考文献

[1] 朱维申,何满潮.复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M].北京:科学出版社,1996.

Zhu Weishen, He Manchao. The stability of surrounding on the complex condition and the dynamic construction mechanics of rock masses. Bijing: Science Press, 1996.

[2] 高谦,苏永华,苏靖.地下矿山工程围岩稳定性模糊动态聚类分区[J].工程地质学报,1997,5(3):205~211.
 Gao Qian, Su Yonghua, Su Jing. Fuzzy dynamic cluster analysis method for zoning of engineering rockmass stability of underground

mines. Journal of Engineering Geology, 1977, **5**(3): 205~211.

[3] 姜福兴,谭云亮,韩继胜,等. 巷道围岩动态工程分类技术研究[J].工程地质学报,1999,7(3):243~248.

Jian Fuxin , Tan Yunliang , Han Jisheng , et. al. . Study on dynamical engineering classification of roadway surrounding rock. Journal of Engineering Geology , 1999 , 7(3) : 243 ~ 248.

[4] 凌标灿.综放面顶板稳定性地质动态评价及控制[D].中国矿 业大学(北京校区)博士学位论文,2002.

Ling Biaocan. Dynamical Geology Evaluation and Controlling Methods of the Roof Stability for Longwall Top - coal Caving Face. Doctoral disaster of China University of Mining and Technology, Bijing campus, 2002.

[5] 肖树芳. 岩体工程地质综述报告[J]. 水文地质工程地质,1993,(1):42~44.

Xiao Shufan. Summarized report of engineering geology on rock masses . Hydrogeology and engineering geology. 1993, (1): $42 \sim 44$.

[6] 凌标灿,黄向宏.巷道断面形状力学效应三维数值模拟[J].淮 南工业学院学报,2002,22(1):6~9.
Ling Biaocan, Huang Xianghong. 3 - dimension numerical simulation analysis on the mechanical effects of roadway across shape. Journal of Huainan Institute of Technology,2002,22(1):6~9.