

小断面硐室突变大断面硐室施工过程 拱顶沉降有限元分析

Finite Element Analysis of Crown Settlement During the Construction Process from Small to Large Section Adit: A Case Study of Qitou Mountain Mine Project, Sanmen County, Taizhou City

谢地发¹, 李恒恒¹, 汤力栋¹, 郑伟¹, 余德基¹, 刘洪¹, 杲加俊², 王锦楠^{2,3}, 徐辉²

(1. 浙江省隧道工程集团有限公司, 浙江 杭州 310011; 2. 浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018; 3. 浙江理工大学科技与艺术学院, 浙江 绍兴 312369)

摘要:为解决现有小断面突变大断面硐室开挖工程中围岩变形大、难控制的难题,本文以台州市三门县其头山矿山项目为工程背景,在提出中导洞及侧壁导洞反向爬坡开挖法的基础上,采用Plaxis2d软件对两种开挖方式下小断面硐室突变大断面硐室的施工过程进行了有限元模拟。结果表明:对于大、小断面硐室,侧壁导洞爬坡开挖法的拱顶下沉量分别略高于中导洞8.0%及5.0%左右;考虑到单炮进尺过小带来的施工效率低以及过大带来的安全性差问题,对于小断面硐室,单炮进尺应控制在2.5 m,侧壁/中导洞开挖时的单日爆破次数均不得超过2次;对于大断面硐室,单炮进尺应控制在3.0 m,侧壁/中导洞开挖时的单日爆破次数不得超过3次及2次。

关键词: 矿山硐室; 断面转换; 开挖方式; 拱顶沉降; 有限元

中图分类号: TD354

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2024)04-0015-06

Abstract: This paper focuses on the Qitou Mountain mining project in Sanmen County, Taizhou City, employing Plaxis2d for the simulation of the excavation process from small to large section adits. The results indicate that for large and small section adits, the crown settlement amount during sidewall pilot tunnel climbing excavation method is approximately 8.0% and 5.0% higher than that of the middle pilot tunnel, respectively. Considering the low construction efficiency caused by too small single-round advance and the poor safety associated with too large single-round advance, for small section adits, the single-round advance should be controlled at 2.5 m, with the number of daily blasts during sidewall/middle pilot tunnel excavation not exceeding two times; for large section adits, the single-round advance should be controlled at 3.0 m, with the number of daily blasts during sidewall/middle pilot tunnel excavation not exceeding three and two times, respectively.

Key words: mine adit; section conversion; excavation method; crown settlement; finite element

1 前言

我国矿产资源丰富,但赋存条件差,目前国内矿山多以井工开采为主,地震、塌陷等灾害频发^[1]。2021年国家矿山安全监察局首次新闻发布会指出,2020年全国共发生矿山事故434起、死亡573人,典型事故累计经济损失达2亿元^[2]。矿山工程中小断面硐室通常与大断面硐室相连,形成矿山的开拓运输系统。与小断面硐室相比,大断面硐室具有空

间更大、地质条件更复杂等特点,高度和跨度的增加使得其开挖难度提高,特别是在由小硐室向大硐室开挖支护成型的过程中,存在从小截面突然变化到大截面的情况,一旦施工工法不当,很容易造成塌方等失控局面。因此,如何有效控制大断面硐室暗挖成型过程中围岩的变形是目前矿山地下开采工程面临的主要问题之一。

目前,小断面硐室突变至大断面硐室过程中围

[作者简介] 谢地发(1974—),男,高级工程师,从事隧道建设、矿山开采、市政桥梁等方面的研究工作。

[基金项目] 浙江省建设科研项目“小断面垂直强突变大断面硐室施工技术研究”(编号:2023k118)

[引用格式] 谢地发,李恒恒,汤力栋,等.小断面硐室突变大断面硐室施工过程拱顶沉降有限元分析[J].中国矿山工程,2024,53(4):15-20+25.

岩变形的控制方式主要有两类,一种为开挖之前选取合适的开挖方式,另一种为开挖过程中设计合理的施工方案。在开挖方式选取方面,刘洪伟等^[3]为解决钱营孜原岩巷小断面扩刷成大断面硐室中围岩变形较大的问题,采用挑顶刷帮平行正向开挖法,从巷道顶部爆破挑顶至硐室高度后再左右刷帮,有效地降低了围岩变形幅度;金宝^[4]为解决地铁车站施工通道断面与主隧道断面之间垂直转换难题,采用CRD正向开挖法和上挑洞正向开挖法,并从转化工序、临时支护费用、安全、质量、综合效益等方面对2种技术进行比选,总结出在地层较好时可优先考虑挑洞正向开挖法,在地质条件较差时考虑CRD正向开挖法;雷勇祥等^[5]以沈阳地铁九号线为背景,考虑到断面转换过程中顶部及底部间距过小从而导致施工中拱顶沉降大的问题,提出了渐变正向开挖法,即小断面隧道在距大断面隧道一定距离时,以一定的外扩角度逐渐扩大,当到达截面变化处时恰好扩大到要求的大断面形状。在具体施工方案方面,黄锋等^[6]以浅埋隧道为背景,使用有限元软件模拟全断面法在不同开挖进尺下的施工全过程,结果表明,循环进尺越小,对围岩的扰动越大且累积变形越大,循环进尺越大,分步开挖引起的沉降越大;张亚龙等^[7]研究了双侧壁工法对隧道深埋段的影响,通过改变循环进尺,比选出最佳进尺为2.4 m;黄金花等^[8]以天峨至北海公路山贡隧道为工程依托,分析了循环进尺长度对围岩稳定性的影响,结果表明:当循环进尺大于2 m时,进尺的增加会导致围岩稳定性快速降低;颜杜民等^[9]以吉图珲高铁富岩1号隧道为例,采用有限元法分析了循环进尺下隧道变形和应力的响应规律,发现循环进尺深度与围岩变形大小之间呈线性关系;袁飞等^[10]以狮子山隧洞出口软岩洞段为研究对象,分析了不同衬砌厚度、衬砌支护时机等条件下围岩变形控制措施,发现最佳衬砌厚度为0.7 m,二次衬砌晚于初期支护5~15 d施作较为合适;何昌国^[11]结合现场实测数据,对红层砂泥岩软弱地层隧道初期支护刚度体系进行了分析,发现该地层浅埋大跨隧道预留变形量应按50~60 mm设置。

综上所述,目前关于小断面突变大断面硐室开挖方式的选取多为正向开挖法,反向开挖法应用较少,与前者相比,后者可减少开挖次数,有利于衬砌早封闭,因此,有必要研究反向开挖法施工技术,以弥补现有技术不足之处。此外,在小断面突变大断

面硐室工程中,大小断面硐室相接、转换等关键部位处的围岩容易发生较大收敛变形,需要结合具体开挖方式细化施工过程,并提出相应的围岩变形控制措施。

有鉴于此,本文依托浙江省台州市三门县其头山矿山项目,以小断面检修平硐突变大断面破碎硐室工程为研究对象,开展了不同开挖方式下硐室施工过程中围岩变形研究,对中导洞爬坡反向开挖法和侧壁导洞爬坡反向开挖法进行了对比,在此基础上提出了小断面硐室及大断面硐室开挖过程中拱顶沉降控制建议,以期为实际工程提供参考。

2 工程概况

浙江交投浙东矿业有限公司三门县其头山矿规划生产规模为1 550万t/年,出让年限15年,矿区面积1.025 7 km²;开采深度+358.24 m~+1.50 m。矿区位于三门县政府驻地105°方向直距约16.4 km,行政隶属三门县健跳镇西渡村、岫岩村、龙潭村。矿区中心地理坐标为:东经121°33'07",北纬29°05'45"。

本项目硐室工程较多,具体如图1所示,主要有破碎硐室、检修硐室、电气硐室、通风机硐室及板喂机硐室。本次研究对象为检修硐室,其开挖长度为55 m,开挖宽度为13 m,开挖高度为15.35 m,开挖量10 250.9 m³,占硐室工程总开挖量的53.27%。检修硐室开挖后拱顶采用200 mm厚双侧钢筋网预应力锚杆喷砼的方式进行支护;侧壁则采用10 cm厚锚网喷砼进行初期支护,以及采用40 cm厚钢筋混凝土进行二次衬砌施工。

3 数值模拟

3.1 开挖方式选取

由于检修平硐(小断面硐室)垂直相交于检修硐室(大断面硐室)的侧壁,且检修平硐的工作面面积为30.34 m³,而检修硐室的工作面面积为206.86 m³,两者拱顶之间的落差达到13 m,造成了小断面硐室突变大断面硐室的施工难题。拟选取2种开挖方式进行模拟比选,分别为中导洞爬坡反向开挖法和侧壁导洞爬坡反向开挖法。

中导洞爬坡反向开挖法示意图如图2所示,首先从检修平硐延伸开挖出一条拐弯的措施平硐,使措施平硐的另一侧工作面平行交汇于检修硐室的工作面,且两者位于同一条中轴线;然后小断面硐室以中导洞、16°角爬坡开挖,当小断面硐室爬坡开挖到

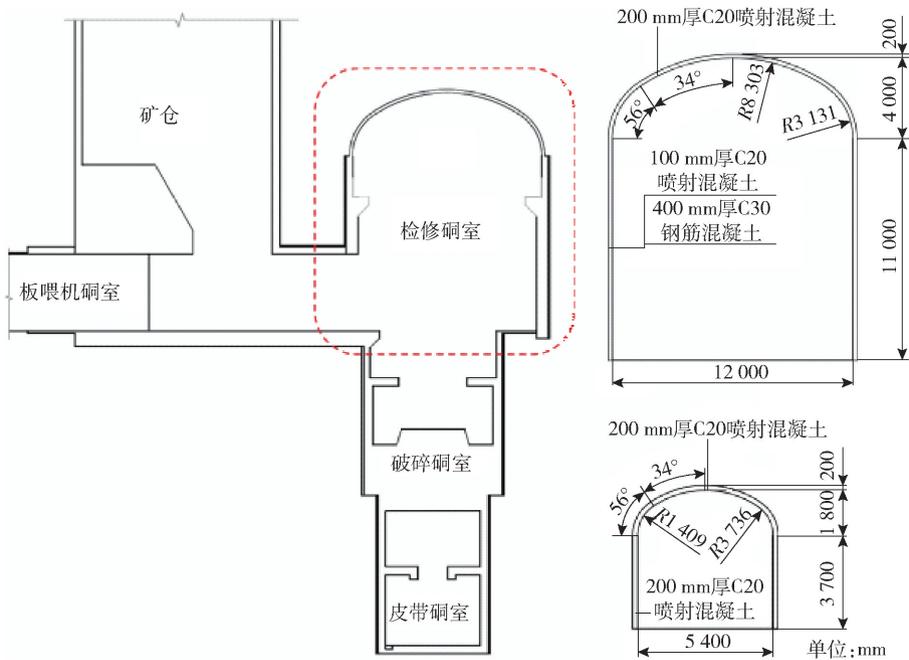


图1 洞室立面布置图

大断面洞室拱顶高度后,开挖小断面洞室两侧及顶部,完成大断面洞室工作面拱部开挖;其后,反向开挖大断面洞室拱部。

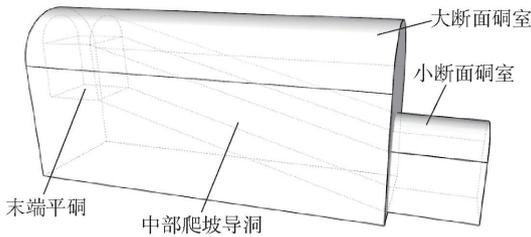


图2 中导洞爬坡反向开挖示意图

侧壁导洞爬坡反向开挖法示意图如图3所示,首先,从检修平洞工作面处直接水平开挖至检修洞室另一侧边墙,形成一条临时横通道;然后在该临时横通道处转向,面向大断面洞室工作面以侧壁导洞、13°角爬坡开挖,当小断面洞室爬坡开挖到与大断面洞室拱脚相切时,开挖小断面洞室另一侧及顶部,完成大断面洞室工作面拱部开挖;其后,反向开挖大断面洞室拱部。

3.2 典型剖面及有限元模型

中导洞以及侧壁导洞爬坡反向开挖法在洞室拱顶扩刷过程中主要分为2步,分别为小断面洞室爬坡段、洞室反向开挖段,因此分别选取中导洞爬坡反向开挖法和侧壁导洞爬坡反向开挖法的2个典型剖面建立数值模型。

采用Paxis2d有限元软件,基于典型剖面建立

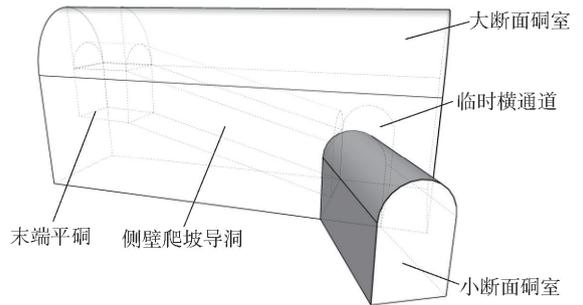


图3 侧壁导洞爬坡反向开挖示意图

有限元数值模型,具体如图4所示。采用高次插值函数的三角形15节点平面应变单元进行网格划分^[12],为了消除边界效应的影响,模型四周水平向及竖向自由度均被约束^[13]。图中Z1点及C1点为特征标记节点,与实际施工时的拱顶沉降观测点位一致。

3.3 参数取值

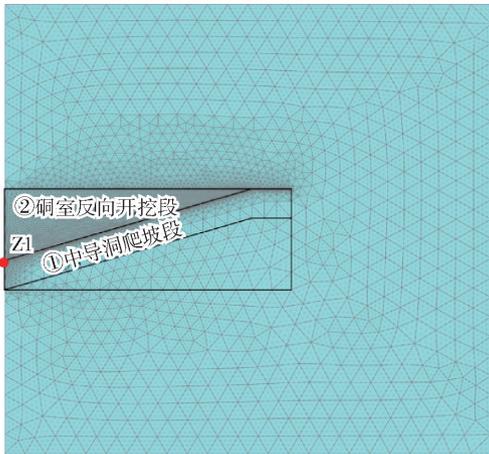
根据矿区地质勘测,该工程所在矿区围岩为凝灰岩,岩石基本质量等级为Ⅲ级。根据室内岩性力学试验测试结果,结合相关文献的取值情况^[14-15],模型的围岩单元及支护单元本构模型参数见表1。

3.4 计算工况

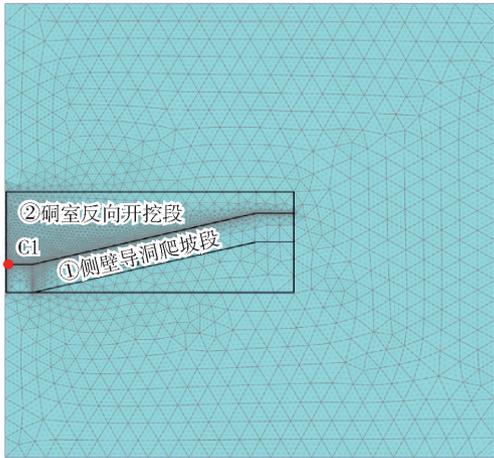
以实际施工工况为依据(单炮进尺3m)对小断面洞室进行开挖模拟,通过标记点Z1及C1获取开挖过程中进洞起点处拱顶沉降变化曲线,并与实际监测值进行对比,以验证模型及所取参数准确性。

表2 计算工况表

类型	开挖方式	单炮进尺/m	日进尺/m
小断面洞室 开挖变形	中导洞爬坡反 向开挖法	2.5	2.5、5、7.5、10
		3	3、6、9、12
	侧壁导洞爬坡 反向开挖法	2.5	2.5、5、7.5、10
		3	3、6、9、12
		3.5	3.5、7、10.5、14
		3.5	3.5、7、10.5、14
大断面洞室 开挖变形	中导洞爬坡反 向开挖法	2.5	2.5、5、7.5、10
		3	3、6、9、12
	侧壁导洞爬坡 反向开挖法	2.5	2.5、5、7.5、10
		3	3、6、9、12
		3.5	3.5、7、10.5、14
		3.5	3.5、7、10.5、14



(a) 中导洞爬坡开挖法



(b) 侧壁导洞爬坡开挖法

图4 有限元模型

表1 围岩单元及支护单元参数取值

参数	围岩	支护
本构模型	霍克布朗	线弹性
容重 γ (kN/m ³)	23.44	25
弹性模量 E /GPa	13.22	32.5
泊松比 μ	0.238	0.2
单轴抗压强度 σ_{ci} (kN/m ²)	162	—
完整岩石材料常数 m_i	0.128	—
地质强度指数 GSI	5	—
界面强度折减因子 R_{inter}	0.68	0.68

分别计算不同开挖方式及循环进尺条件下小断面洞室及大断面洞室开挖过程中的拱顶最大下沉量。结合前期设计方案及现场实际情况,单次爆破进尺以及对应的单日总进尺设置情况分别见表2。

4 变形控制标准

如表3所示,根据《公路隧道施工技术规范》

(JTG F60—2009)、《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80—2004)以及《公路隧道工程现场施工技术》提出的有关规定^[16-18],结合数值模拟计算得到的最大拱顶沉降量,对小断面洞室突变大断面洞室的开挖过程提出相关工程建议。

表3 量测数据管理基准参考值

指标内容	日、法、德		推荐基准值
	规范值	城市地铁	山岭隧道
地面最大沉陷量/mm	50	30	60
地面沉陷槽拐点曲率	1/300	1/500	1/300
地层损失系数	5%	5%	5%
洞内边墙水平收敛/mm	20~40	20	(0.1~0.2)D%
洞内拱顶下沉(mm)	75~229	50	(0.3~0.4)D%

注: D 为开挖洞室最大跨度, m。

本项目中检修洞室属山岭隧道范畴,为保守起见,小断面洞室及大断面洞室拱顶下沉基准值分别按0.4D%及0.3D%计算。本项目小断面洞室最大跨度5.4 m,大断面洞室最大跨度12 m,因此拱顶下沉基准值分别为21.6 mm及36 mm。

5 结果分析

5.1 模型可靠性验证

图5所示为不同开挖方式下小断面洞室进洞段拱顶沉降监测值与有限元计算值对比图,可以看到,随着开挖过程的进行,进洞段拱顶沉降呈现出先快后慢的趋势,监测值显示中导洞及侧壁导洞爬坡开挖后,进洞段Z1、C1点处的拱顶沉降最大值分别为7.22和9.64 mm,而有限元计算结果分别为7.03、8.90 mm,相对误差分别在2.6%及4.7%,模拟结果与实测数据吻合较好,表明所建立的数值模型和参

数具有较高的精度和可靠性。

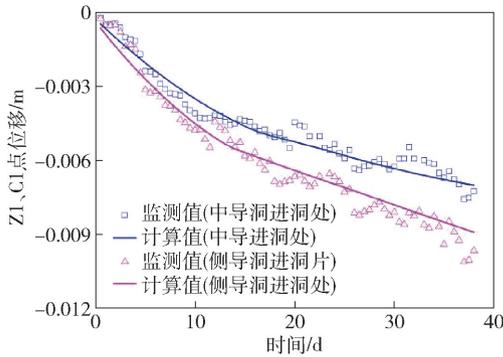


图5 监测值与计算值对比

5.2 不同日进尺下小断面硐室拱顶沉降

图6所示为不同爆破进尺下小断面硐室拱顶最大沉降变化趋势图,可以看到,小断面硐室的拱顶下沉量随着日进尺的增加而增大,最大沉降发生在爬坡中段至爬坡末端之间,这主要是因为在这部分开挖过程中工作面的推进与支护的施作是交替进行的,在开挖爬坡段后半部分时,前半部分施作的混凝土支护已达到一定龄期,拱顶沉降得到有效控制。在日进尺由2.5 m增加到10 m、3.0 m增加到12.0 m、3.5 m增加到14 m时,采用中导洞及侧壁导洞爬坡开挖的小断面硐室拱顶下沉量增幅较为接近,分别约为78.2%、103.6%、121.5%。此外,各工况下计算结果显示,侧壁导洞爬坡开挖的小断面硐室拱顶下沉量略高于中导洞5.0%左右,这主要是因为与中导洞开挖法相比,侧壁导洞多出了一段与大断面硐室等长的临时横通道段,对应图5纵剖面云图中爬坡起始段左侧的水平段,因此侧壁导洞开挖的小断面硐室更长,爆破次数更多,对围岩的扰动次数更大,因此拱顶沉降也更大。

结合第3节中的拱顶沉降量控制标准,对小断面硐室的开挖提出相关建议:当单炮进尺为2.5 m时,采用中导洞爬坡反向开挖法及侧壁导洞爬坡反向开挖法时对应的警戒日进尺分别为5 m及4.2 m,即前者日爆破次数不得超过2次,后者日爆破次数不得超过1次;当单炮进尺为3 m时,对应的警戒日进尺分别为4.7 m及3.9 m,两种开挖方式日爆破次数均不得超过1次;当单炮进尺为3.5 m时,对应的警戒日进尺进一步降为4.5 m及3.7 m,同样的,两种开挖方式日爆破次数不得超过1次。综合考虑施工效率及安全,单炮进尺2.5 m时为最优工况。

5.3 不同日进尺下大断面硐室拱顶沉降

图7所示为不同爆破进尺下大断面硐室拱顶最

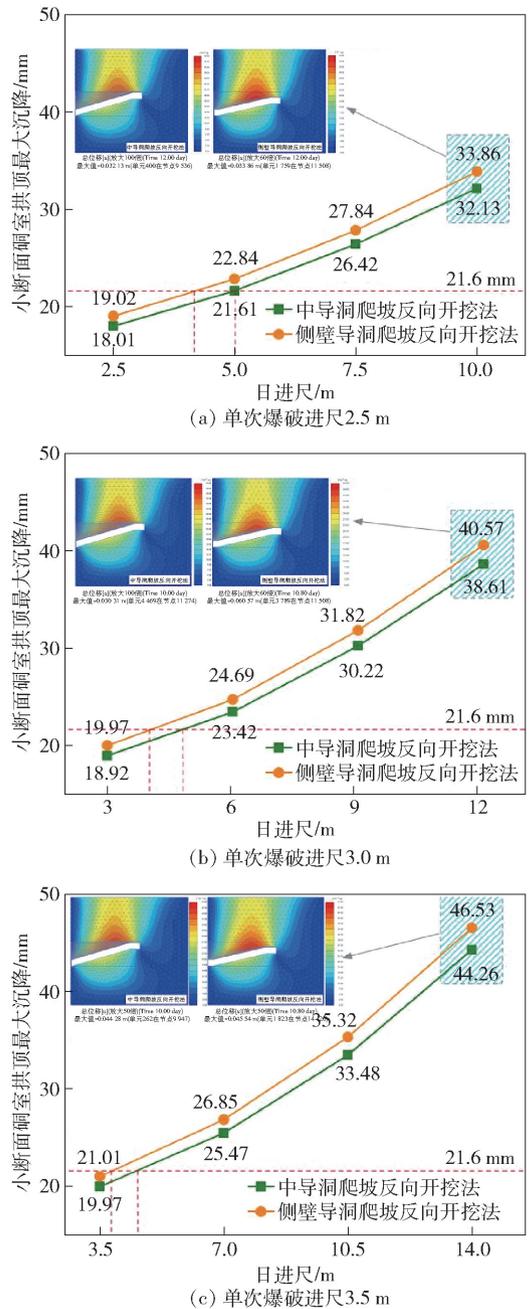


图6 不同爆破进尺下小断面硐室拱顶最大沉降

大沉降变化趋势图,可以看到,随着日进尺的增加,硐室拱顶沉降量也相应增大,最大下沉量发生在末端平硐段起点至大断面硐室中部之间,这主要是因为在这部分推进区域内,反向扩刷大断面硐室拱部的过程中,首先需要对小断面硐室顶部进行爆破修平,然后才能扩刷大断面硐室拱部,因此与后续的一次爆破成型相比,该区间内的爆破次数有所增加,对围岩扰动更大,下沉量也更大;在日进尺由2.5 m增加到10 m、3.0 m增加到12.0 m、3.5 m增

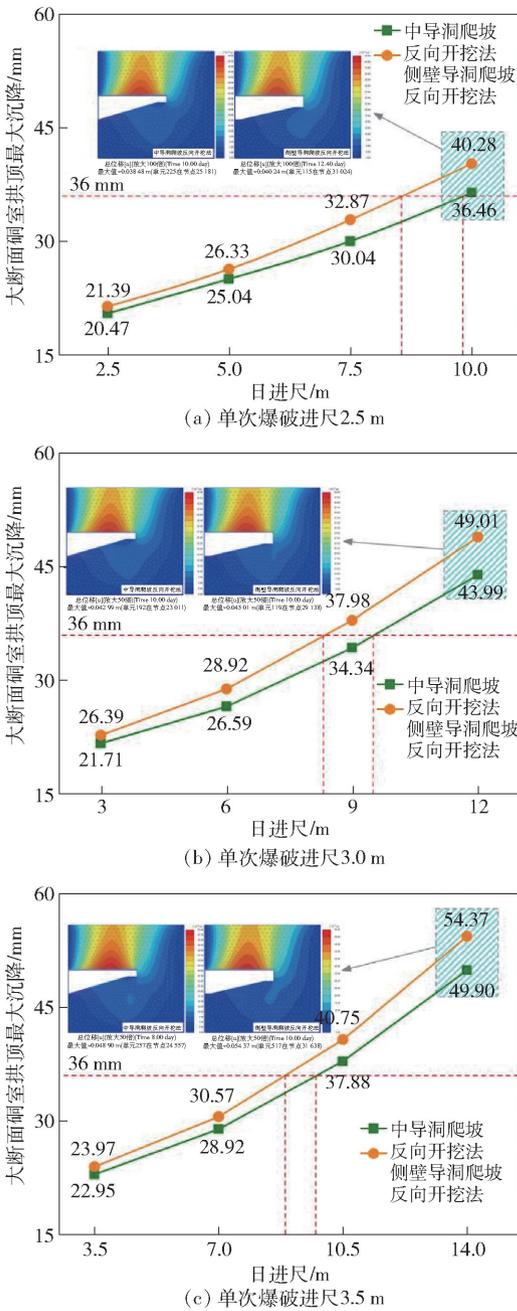


图7 不同爆破进尺下大断面硐室拱顶最大沉降

加到 14 m 时,采用中导洞及侧壁导洞爬坡反向开挖的大断面硐室拱顶下沉量增幅较为接近,分别约为 83.2%、108.8%、122.1%,此外,各工况下计算结果显示,侧壁导洞爬坡反向开挖的大断面硐室拱顶下沉量略高于中导洞 8.0% 左右,这主要是因为爬坡开挖过程中,中导洞爬坡角度大于侧壁导洞爬坡角度,导致前者在爬坡阶段的开挖量大于后者,因此在反向推进阶段,侧壁导洞反向推进过程中的待开挖量多于中导洞,在相同进尺下需要的炸药量就更多,因此对围岩造成的扰动更大。

结合第 3 节中的拱顶沉降量控制标准,对大断面硐室的开挖提出相关建议:当单炮进尺为 2.5 m 时,采用中导洞爬坡反向开挖法及侧壁导洞爬坡反向开挖法时对应的警戒日进尺分别为 10 m 及 8.4 m,即前者日爆破次数不得超过 4 次,后者日爆破次数不得超过 3 次;当单炮进尺为 3 m 时,对应的警戒日进尺分别为 9.6 m 及 8.3 m,日爆破次数不得超过 3 次及 2 次;当单炮进尺为 3.5 m 时,对应的警戒日进尺分别为 9.3 m 及 8.2 m,同样的,日爆破次数不得超过 3 次及 2 次。综合考虑施工效率及安全,单炮进尺 3 m 时为最优工况。

6 结论

本文依托浙江省台州市三门县其头山矿山项目,以Ⅲ级凝灰岩下小断面检修平硐突变大断面破碎硐室工程为研究对象,开展了不同开挖方式下硐室施工过程中围岩变形研究,获得的主要结论如下:

- (1) 实际工况中小断面硐室开挖时,Z1、C1 点处的拱顶沉降监测值与有限元计算值间的相对误差分别在 2.6% 及 4.7% 左右,吻合度较高,表明所建立的数值模型和参数是准确合理的。
 - (2) 对于小断面硐室,最佳施工工况为:控制单炮进尺为 2.5 m,中导洞及侧壁导洞开挖时单日总进尺不超过 5.0 m 及 4.2 m。
 - (3) 对于大断面硐室,最佳施工工况为:控制单炮进尺为 3 m,中导洞及侧壁导洞开挖时单日总进尺不超过 9.6 m 及 8.3 m。
- 文中硐室围岩为Ⅲ级凝灰岩,研究结果对类似地层中小断面突变大断面硐室开挖工程具有一定参考价值,建议后续在类似地质条件开展相应研究,进一步完善本文提出的开挖方式,拓展其应用范围。

[参考文献]

- [1] 张胜. 基于 BIM 的矿山建设工程施工安全管理研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 国家矿山安全监察局召开 2021 年首次新闻发布会 [EB/OL]. (2021-01-12) [2022-08-24].
- [3] 刘洪伟,王斌. 钱营孜矿岩巷小断面扩刷大断面硐室施工方法 [J]. 能源技术与管理, 2012(5):81-82+97.
- [4] 金宝. 小断面通道进入大断面主洞垂直交叉口 CRD 法与上挑洞法施工比较 [J]. 隧道建设, 2010, 30(6):701-705.