

超大断面小净距隧道应力场演化研究

蒋庆¹, 范宏运^{2*}, 李涛¹, 周宗青²

(1. 山东高速济莱城际公路有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心)

摘要:近年,对于超大断面小净距隧道应力场演化过程问题,国内外学者都进行了深入研究,并取得了实质性成果。该文综合考虑济南市东南二环绕城高速公路大岭隧道进口净距较小、埋深较浅等特点,选取大岭隧道进口段作为研究对象,借助 Ansys、Auto CAD 等软件,基于有限差分软件 FLAC^{3D},构建了大岭隧道进口段的三维模型,开展了超大断面小净距隧道全工序施工数值模拟工作,对比分析了超大断面小净距隧道分别采用 CD 法及台阶法施工过程中隧道围岩变形规律,探究了 CD 法施工过程中隧道围岩塑性区分布及应力演化情况。模拟结果表明:采用 CD 法和台阶法施工时,隧道开挖破坏了隧道原有应力分布状态,导致拱顶围岩均出现较大速率的位移沉降量。其中,采用 CD 法施工时隧道围岩整体变形相对较小,但是横撑的拆除引起隧道围岩变形、应力的突变,易出现塌方等事故,需加强支护。此外,综合考虑超大断面小净距隧道采用 CD 法施工过程中先行洞与后行洞之间的相互影响作用,研究了隧道围岩塑性区时空效应及其应力演变过程,研究结果可为超大断面小净距隧道施工及隧道围岩力学稳定性评价提供参考。

关键词:超大断面;小净距;塑性区;应力演化

1 引言

随着中国经济的飞速发展,道路路宽不断扩展,穿山隧道的建设也面临着隧道断面增大、净距减小等施工难题,给隧道安全施工带来了新的挑战。

超大断面小净距隧道的一般特征为两隧道洞口中线间距小于 1.5 倍洞口半径,此类隧道能够很好地适应不同的地质条件,便于隧道线路选线以及施工规划。由于外部地质环境的各向异性,促使超大断面小净距隧道在施工过程中还需考虑由于自身断面大、净距小等特点带来的问题,即先行洞围岩以及中夹岩柱受施工扰动导致内部节理、裂隙、断层失稳等现象。

近年来,国内外学者在研究超大断面小净距隧道施工方面取得了丰硕成果,中隔壁法(CD 法)和双侧壁法在超大断面小净距隧道施工方面都得到了广泛的应用,并取得了很好的效果。但是对于超大断面小净距隧道围岩塑性区时空效应及其应力场演化等方面的研究却少之甚少。基于此,该文以济南市东南二环绕城高速公路大岭隧道进口段为研究对象,综合考虑工

程实际地质条件及计算需求等,对采用台阶法及 CD 法施工的超大断面小净距隧道围岩空间变形规律进行对比分析,确定 CD 法为超大断面小净距隧道施工的优势工法,对 CD 法施工过程中超大断面小净距隧道围岩塑性区的时空效应及应力场演变过程进行探讨,为该类隧道的施工及设计提供参考。

2 工程概况

济南绕城高速公路济南连接线工程浅埋小净距段设计采用 CD 法及台阶法施工,洞口段尽量人工开挖,先行洞与后行洞均先开挖靠近中岩柱的小导洞,每循环进尺长度为 1~2 倍拱架间距(即 0.6~1.2 m,具体视围岩情况而定),左、右线掌子面错开 2 倍洞径以上距离(数值模拟中取 50 m)。此外,严格控制爆破施工,由于在施工过程中,后行洞因爆破产生的震动波对先行洞初期支护造成威胁,因此要求后行洞爆破震动速度不超过 8 cm/s。

大岭隧道作为该项目建设过程中的难点工程,其施工安全问题亟待解决。根据设计资料,大岭隧道地

收稿日期:2020-09-10(修改稿)

作者简介:蒋庆,男,硕士,工程师. E-mail:279415652@qq.com

* 通信作者:范宏运,男,硕士研究生. E-mail:1281833396@qq.com

处中低山丘陵区,揭露地层主要由第四系残坡积土层及基岩组成,其隧道地质剖面图详见图 1。其中,大岭隧道左右线进口段为 V 级围岩,且多为碎石土,强风化灰岩,围岩层间结合差,岩体破碎,岩芯多呈块状、碎块状及少量短柱状,围岩自稳能力差。

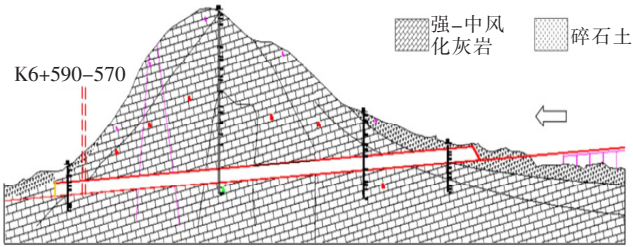


图 1 大岭隧道地质剖面图(单位:m)

依据设计资料,大岭隧道采用 CD 法以及台阶法施工,单次开挖均为 1~2 榀拱架间距。其中,台阶法各开挖分部间错开 10~15 m,施工示意图如图 2 所示;CD 法各开挖分部间错开 5~7 m,施工示意图如图 3 所示。

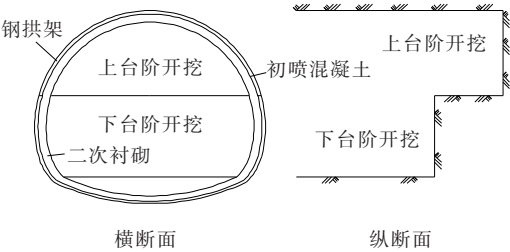


图 2 台阶法施工示意图

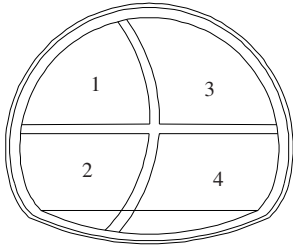


图 3 CD 法施工示意图

3 模型构建及数值模拟

FLAC^{3D} 作为一款经典的连续介质力学分析软件,其计算单元均为四面体,采用显式拉格朗日算法和混合离散法技术,能够非常准确地模拟材料的塑性破坏和流动。此外,由于 FLAC^{3D} 软件在计算过程中无需形成刚度矩阵,因此 FLAC^{3D} 在使用较小内存的情况下就可以求解较大规模的三维问题。但是在模型构

建方面,由于内嵌的 Fish 语言存在的局限性,导致 FLAC^{3D} 无法在软件内部建立标准的隧道模型,需借助 Ansys 等软件辅助建模。该文通过 Auto CAD 软件建立隧道的平面模型,再借助 Ansys 软件对平面模型进行立体化,以构建标准的隧道三维模型。

3.1 力学参数选取

根据设计资料,济南绕城高速公路济南连接线工程大岭隧道进口段上层覆盖掩体主要是中风化灰岩,为提高数值模拟分析的效率,将隧道上层覆盖岩体全部简化为中风化灰岩,以排除其他岩体对数值模拟的干扰,灰岩的力学参数见表 1。

表 1 隧道围岩基本物理参数

弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
3.38	0.26	112.1	11.8	0.66	25

隧道主洞洞身支护采用 $\phi 25$ mm 中空注浆锚杆、钢筋网片、0.3 m 厚 C25 喷射混凝土,H200×200 型钢拱架,V 级围岩型钢拱架纵向间距为 0.6 m/榀,IV 级围岩型钢拱架纵向间距为 0.8 m/榀,设临时仰拱。但是在数值模拟过程中,由于初期支护以及二次衬砌中均存在钢筋等材料,对数值模拟结果造成偏差。因此,在定义隧道结构材料时,需要对初期支护以及二次衬砌材料的原有参数进行等效处理,等效处理后的参数见表 2。

表 2 隧道结构材料等效后基本物理参数

项目	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)
初次支护	31.96	0.25	0.25	2 500
二次衬砌	41.92	0.20	0.70	2 500

3.2 计算模型构建

考虑到隧道模型在数值模拟过程中需要反复使用,在建立隧道围岩模型时,将隧道围岩整体简化成立方体,以提升数值模拟的效率。为保证数值模拟的准确性以及真实性,左洞的隧道埋深定义为 25 m,右洞的隧道埋深定义为 30 m。对于隧道围岩模型的左右边界,考虑到隧道的边界效应对数值模拟结果的影响,理论上应使隧道围岩左右边界的距离为 3~5 倍洞径,该文取 3 倍洞径,即左右边界的距离为 180 m。在进行数值模拟过程中,需完整地模拟隧道开挖的全部工序,这也就要求隧道模型有足够的长度来完成隧道开挖的所有工序。为此,将隧道围岩模型的长度定义为

44 m,以保证数值模拟过程的完整性以及真实性。

依据济南绕城高速公路济南连接线大岭隧道设计图纸可知,左右洞隧道跨度均定义为 20.1 m,隧道高度定义为 15.3 m,左右洞隧道净距定义为 13.2 m。其中,左右洞进口段采用 CD 法进行施工,当围岩级别达到Ⅳ级时,改变施工方法为台阶法。

结合 Flac^{3D} 及 Ansys 软件,实现对大岭隧道的半精细化建模。首先,利用 Auto CAD 软件构建隧道的平面 2D 模型,形成 .sat 文件,导入到 Ansys 软件中进行划分网格、三维拉伸等处理,形成 .dec 文件,导入 Flac^{3D},形成隧道的三维立体模型,详见图 4、5。

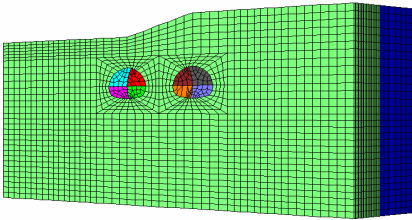


图 4 隧道三维模型图

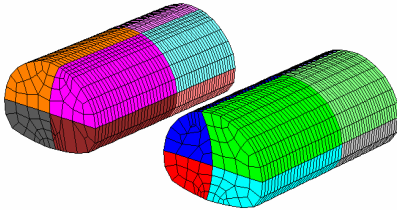


图 5 双洞细节图

3.3 数值模拟

隧道模型构建完成后,对隧道模型施加边界约束,约束立方体模型底面以及环向四面的位移变化,顶面定义为自由边界。计算过程中,为保证数值模拟的真实性,忽略岩体自身重力以外的其他力,得到如图 6 所示的初始地应力模型。由图 6 可知:受隧道地表高程的影响,隧道初始地应力模型呈现出微偏压的应力分布状态。

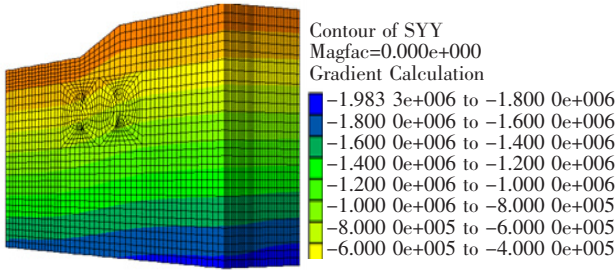


图 6 初始地应力模型(单位:Pa)

隧道开挖支护数值模拟过程中,当采用 CD 法施

工时,单循环进尺 1.2 m;采用台阶法施工时,单循环进尺 1.6 m。CD 法施工过程中,隧道开挖完成后,及时拆除横撑,布设二次衬砌。

4 数值模拟结果及分析

4.1 空间变形规律

4.1.1 拱顶沉降规律

图 7 为左洞 CD 法施工拱顶沉降曲线。CD 法施工过程中,隧道 1 部开挖完成后,拱顶围岩沉降突变,变形速率及变形量较大,围岩稳定性较差,易出现掉块、甚至塌方等工程事故。随着隧道 2 部、3 部的开挖,隧道拱顶沉降速率变小且变形量趋于稳定。

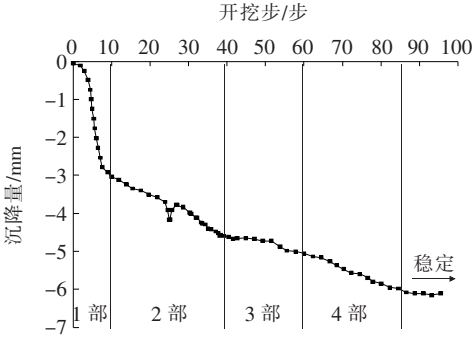


图 7 CD 法拱顶沉降曲线

图 8 为右洞台阶法施工拱顶沉降曲线。

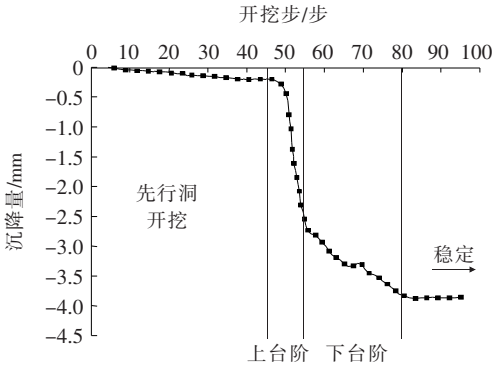
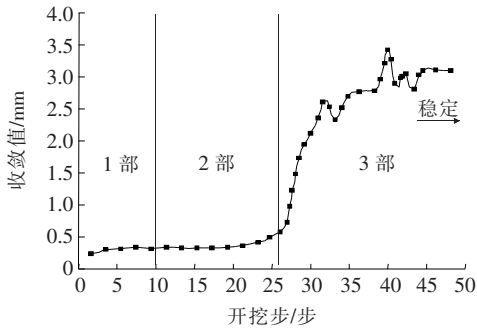


图 8 台阶法拱顶沉降曲线

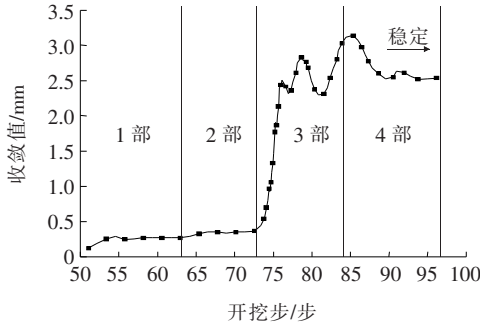
由图 8 可知:受先行洞开挖的影响,隧道右洞拱顶围岩在开挖前即出现小变形。隧道右洞上台阶开挖完成,隧道拱顶围岩出现较大沉降,且变化速率较大。由此可知,该阶段隧道围岩稳定性极差,施工过程中应加强支护,避免工程事故。上台阶开挖完成后,隧道拱顶沉降速率降低,最终达到稳定值。

4.1.2 边墙收敛规律

图 9 为 CD 法施工左、右洞边墙收敛曲线。图 10 为台阶法施工左、右洞边墙收敛曲线。

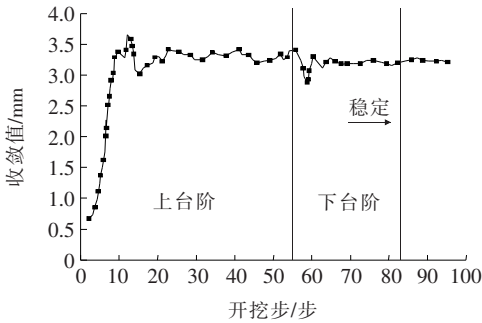


(a) 左洞

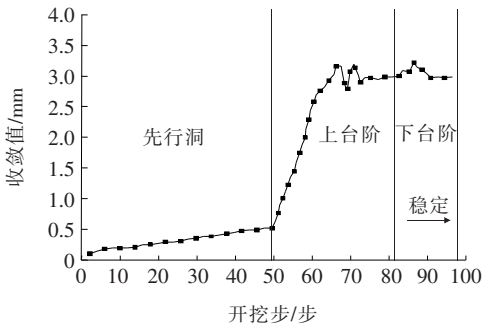


(b) 右洞

图 9 CD 法左、右洞边墙收敛曲线



(a) 左洞



(b) 右洞

图 10 台阶法左、右洞边墙收敛规律

由图 9(a)可知:CD 法施工过程中,隧道左洞(先行洞)1、2 部开挖时,边墙围岩收敛值变化平缓,隧道 3 部开挖时,边墙收敛值出现突变,且变形量较大。隧道

开挖完成后,边墙收敛值出现波动,频率较大,幅度较高,说明隧道边墙围岩处于不稳定状态。

由图 9(b)可知:隧道右洞(后行洞)边墙围岩收敛规律与隧道左洞大体一致,但由于受先行洞施工影响,在隧道开挖前期,边墙收敛即出现小幅度的变化,且最终收敛值相对于左洞较小。

由图 10 可知:台阶法施工过程中,隧道左洞(先行洞)上台阶的开挖导致边墙收敛出现突变,且速率较快、变形量较大。此外,隧道右洞(后行洞)受先行洞开挖影响,边墙收敛出现变化,且变化均匀、变形量较小。隧道左洞上台阶开挖完成后,边墙收敛值以大频率、小幅度进行波动,说明边墙围岩处于不稳定状态。隧道下台阶开挖过程中,隧道边墙收敛出现小幅度变化。隧道右洞(后行洞)的边墙收敛规律和隧道左洞大体一致,但是最终收敛量相对于左洞较小。

4.2 塑性区分布研究

塑性区作为反映隧道围岩危险程度的重要指标之一,对研究超大断面小净距隧道安全施工有着极大的参考价值。由此,在研究隧道塑性区分布的过程中,选取 0~10 m 开挖断面为研究对象,其塑性区的形态、大小以及分布情况见图 11。

隧道开挖意味着隧道围岩存在发生形变的必然性,由此说明,隧道开挖代表隧道围岩进入塑性状态。隧道某开挖部的施工,将必然导致其他开挖部的塑性区出现扩散现象,即塑性区面积增大。在隧道安全施工方面,根据图 11 塑性区的分布结果,施工应注意以下问题:

(1) 采用台阶法施工:① 前文中提及过,1 部开挖将导致隧道拱顶沉降量出现急剧变化。根据分布图也可看出,在开挖隧道 1 部时,隧道拱顶的塑性区分布最大,意味着隧道开挖风险越大,越应注意加强支护等措施;② 采用台阶法施工时,下台阶的开挖将导致隧道边墙塑性区出现急剧上升,意味着隧道边墙易发生工程事故,在施工过程中应提高警惕。

(2) 采用 CD 法施工:① 隧道围岩塑性区主要分布在隧道拱肩位置,说明采用 CD 法施工作业过程中,在开挖隧道 1、3 部时,最容易发生工程事故;② 在隧道各部完成开挖后,需要拆除隧道中隔壁与围岩之间的横撑,即拆撑工序。在拆撑过程中,围岩塑性区出现较大范围的扩散现象,由此判断,拆撑在隧道施工过程中存在较大的危险。

4.3 围岩应力演化

围岩应力演化主要反映隧道内部的受力情况,对

隧道安全施工以及内部受力分析起到很大的作用(图12)。

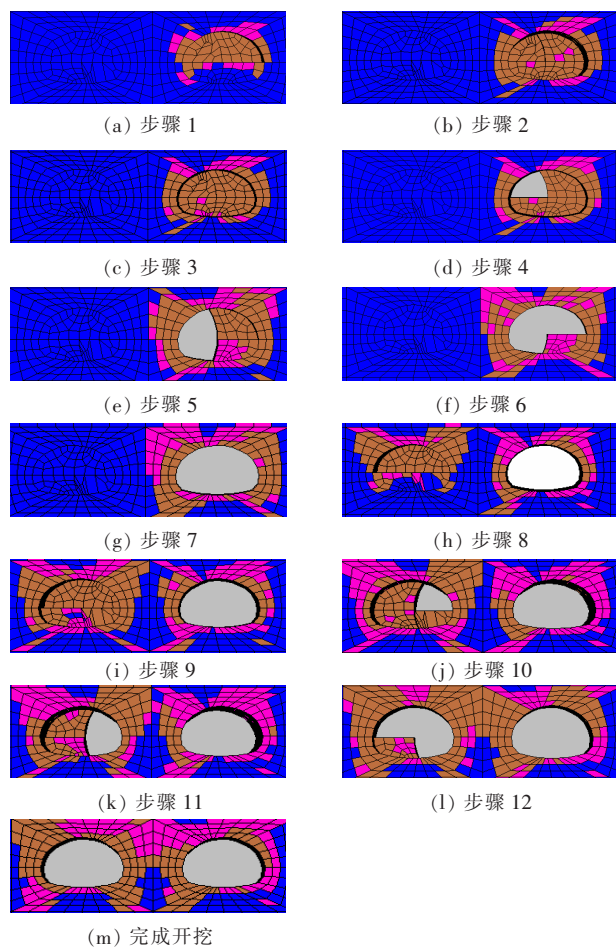


图11 各部开挖过程塑性区分布简化图

由图12可知:采用台阶法施工过程中,左洞1部开挖完成后,隧道掌子面附近围岩应力值增大,特别是拱顶附近,应力集中区面积以及应力值都大幅增大。左洞2部开挖完成后,1部围岩应力值出现削弱现象,但是应力分布面积增大。采用CD法施工时,在左洞隧道1部开挖完成后,隧道围岩的应力值出现突变。左洞2、3部开挖过程中,隧道围岩应力值上升,但上升幅度较小。左洞4部开挖完成后,由于左导坑的先行开挖,导致左导坑围岩的整体应力值较右导坑小。

右洞开挖过程中,洞周围岩竖向应力的演化过程与左洞基本相同。但中夹岩墙处竖向应力集中程度继续增大。右洞开挖完成后,左洞内外侧竖向应力均发生了增大,顶部和底部竖向应力变化范围比左洞大。

5 结论

以超大断面小净距隧道应力场演化为研究出发

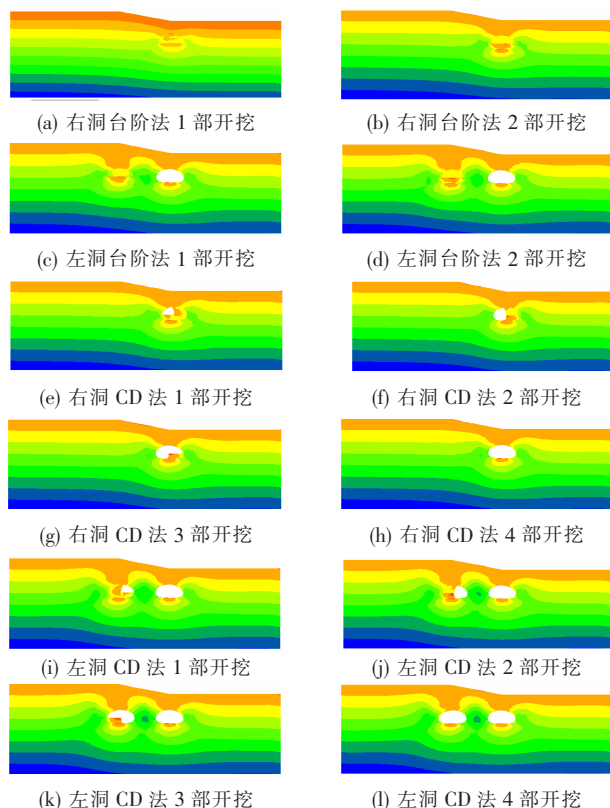


图12 围岩应力演化简图

点,基于有限差分软件Flac^{3D}对此类隧道进行数值模拟分析,综合考虑工程实际以及计算的必要性,对超大断面小净距隧道的空间变形规律、塑性区分布以及应力场演化过程进行了深入研究,得到如下结论:

(1) 在超大断面小净距隧道施工前期,由于隧道开挖促使拱顶及边墙围岩出现位移突变,稳定性降低。此外,先行洞的开挖对后行洞的围岩稳定性造成影响,促使后行洞围岩在未开挖即出现较小的变形。

(2) 根据超大断面小净距隧道在施工过程中塑性区分布情况及应力演化过程,确定了隧道开挖部分对隧道不同部位围岩稳定性的影响程度。采用台阶法施工时,上台阶开挖对隧道围岩稳定性影响最大,下台阶开挖对隧道边墙稳定性影响最大;采用CD法施工时,拆撑导致隧道围岩塑性区突变,危险性最大,建议该工序施工时应加强安全防护工作,避免工程事故的发生。

参考文献:

- [1] 曲海峰. 扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[D]. 同济大学博士学位论文, 2007.
- [2] 安永林. 偏压隧道围岩压力分布规律理论研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011(4).
- [3] 孙景凤, 李文华, 董亥兴, 等. 超大净距大跨度隧道岩柱稳定性分析[J]. 中外公路, 2014(2).

明挖隧道衬砌多点对称布料混凝土浇筑施工方法研究

张国浩, 吴晓龙

(中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要:隧道衬砌施工是隧道施工质量控制的关键工序,如果控制不佳,极易引起衬砌开裂等施工病害。传统的衬砌布料施工直接采用混凝土泵送设备浇筑,在浇筑过程中需要不断移动布料点位置,施工效率较低,易出现冷缝、局部不密实等病害。为了解决这一问题,该文以京雄铁路机场2号线为依托,通过理论与现场试验相结合,研究一种多点对称布料混凝土浇筑施工方法。研究结果表明:这种施工方法操作简便,可自动完成后续布料工作,无需过多人工操作。能够实现多点布料连续,使得混凝土基本实现连续浇筑,提高混凝土的浇筑质量,可在明挖隧道混凝土浇筑施工中推广应用。

关键词:明挖隧道;衬砌施工;对称布料;质量控制

明挖隧道主要适用于浅埋隧道施工,通过基坑开挖为隧道衬砌提供作业空间,在衬砌施工完成后再进行回填成型。对于明挖法施工隧道而言,衬砌施工是隧道施工质量控制的关键环节,也是明挖隧道质量较难管控的环节和质量控制的要点。如何提高明挖隧道衬砌混凝土的施工质量,是明挖隧道需要解决的关键技术之一。

明挖隧道混凝土衬砌施工采用由下到上的施工方法,先进行仰拱与填充施工,后进行侧墙与顶板施工。侧墙与顶板施工均采用传统的混凝土浇筑工艺——单点浇筑工艺,即单侧混凝土通过一台混凝土泵送车通过反复移动布料点的方式完成混凝土浇筑。这种浇筑方法需要在浇筑过程中反复移动浇筑点,施工效率较低,且在施工过程中混凝土浇筑不连续,要求混凝土塌

- *****
- [4] 黄利全,卢世杰,张科.小净距隧道净距调整对围岩受力及稳定性的影响[J].中外公路,2009(1).
- [5] 张铁柱.四车道特大断面小净距公路隧道力学响应分析[J].土木工程学报,2015(s1).
- [6] 蒋树屏.公路隧道工程品质与技术对策[J].现代隧道技术,2017(4).
- [7] 刘伟.小净距公路隧道净距优化研究[D].同济大学博士学位论文,2004.
- [8] 贺鹏.裂隙岩体小净距超大断面隧道围岩非连续变形分析[J].岩土工程学报,2018(10).
- [9] 尹光志,曹多阳,李铃.复杂地质条件下隧道围岩和支护稳定性分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007(2).
- [10] 夏才初,龚建伍,唐颖,等.大断面小净距公路隧道现场监测分析[J].岩石力学与工程学报,2007(1).
- [11] CAI M, KAISER PK. Assessment of Excavation Damaged Zone Using a Micromechanics Model[J]. Tunneling and Underground Space Technolog, 2005, 20(4): 301-310.
- [12] 姚勇,何川,晏启祥.董家山隧道小净距段爆破控制的数值模拟[J].岩土力学,2004(s2).
- [13] 姚勇,晏启祥,周俐俐.小净距隧道在不同开挖方式下的力学效应分析[J].西南科技大学学报,2005(2).
- [14] 彭文斌.Flac^{3D}实用教程[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 李围,洗进.隧道及地下工程 Flac^{3D}解析方法[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [16] 黄庆,胡庆国,何忠明.基于FLAC^{3D}强度折减法的厚覆盖层边坡开挖稳定性分析[J].中外公路,2012(4).
- [17] 王剑晨,张顶立,等.北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测[J].岩石力学与工程学报,2014(5).
- [18] 韦秉旭,唐辉湘,陈尤.CRD法与上下台阶法在隧道开挖中的效果对比及数值分析[J].中外公路,2011(4).
- [19] 严邵洋,李亮辉,高燕希,等.公路隧道开挖渗流场的有限差分法分析[J].中外公路,2007(6).