

软弱破碎围岩隧道开挖支护中 CD 法与环形开挖留核心土法对比分析^{*}

梁松林¹, 张瑞富¹, 段绪彬¹, 杨洁²

(1.广西路建工程集团有限公司, 广西 南宁 650500; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对 V 级围岩隧道岩体破碎, 开挖中易发生松动变形、掌子面挤出、拱顶坍塌及地表沉降过大等病害的问题, 基于 FLAC^{3D} 有限差分软件, 对采用环形开挖留核心土法及中隔壁法(CD 法)施工过程中围岩应力、位移和塑性区范围发展情况进行对比, 分析不同开挖支护方法对围岩稳定性的影响。结果表明, 相较于环形开挖留核心土法, CD 法具有施工扰动小、初期支护封闭早、围岩位移及塑性区面积较小的优点, 更适合于 V 级围岩隧道的开挖支护。

关键词: 隧道; 中隔壁法(CD 法); 环形开挖留核心土法; 开挖支护; 软弱破碎围岩

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)03-0151-04

隧道开挖穿越软弱破碎围岩, 由于其强度低、自稳能力差, 易发生塑性破坏, 尤其是掌子面极易发生岩体松动脱落, 产生较大内空位移, 导致掌子面失稳、拱顶坍塌、地表沉陷等破坏^[1]。为避免这些工程灾害的发生, 软弱破碎围岩隧道施工中常采用分部开挖法(SEM)^[2], 如环形开挖留核心土法^[3-4]、中隔壁法(CD 法)^[5]、交叉中隔壁法(CRD 法)^[6]和双侧壁导坑法^[7]等, 其中环形开挖留核心土法和 CD 法最常用, 这两种方法可以尽可能地控制各施工子步的变形, 从而控制隧道施工总变形。两种施工方法虽被广泛应用于软弱破碎围岩隧道施工, 但对其施工过程中力学行为的研究较少。本文针对某隧道工程, 利用 FLAC^{3D} 有限差分软件进行建模和数值计算, 研究 CD 法和环形开挖留核心土法在 IV 级以上围岩隧道施工中的效果及对围岩稳定性的影响。

1 工程概况

某高速公路小径距隧道的限界净宽为 2 m × 10.75 m, 限界净高为 5.0 m。右洞 K34+200—246 段为进洞段, 洞顶覆盖层较薄, 围岩主要为残坡积碎石土, 稍密~中密, 为松软散体结构, 围岩等级为 V 级, 围岩顶、壁不稳定, 拱部无支护时极不稳定, 隧道成洞困难。该段隧道地势较低平, 大气降水、地表水易渗入, 严重影响围岩稳定性。

原设计施工方案为双侧壁导坑法。考虑到工期较紧、原材料价格高, 施工方拟采用环形开挖留核心土法或 CD 法施工(见图 1), 其中环形开挖留核心土法的上台阶超前下台阶 6~10 m, 两种方法的循环进尺 ≤ 1 m。

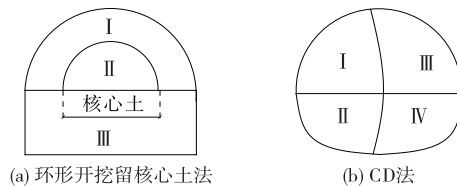


图 1 隧道施工方法示意图

2 模型建立及参数设定

2.1 模型建立

对隧道右洞进洞段某典型断面进行适当简化, 建立 FLAC^{3D} 模型。考虑开挖的影响范围, 模型横向、纵向、竖向边界即 X、Y、Z 方向的尺寸分别取 35 m、40 m、55 m, 隧道埋深 20 m, 隧道底部距下边界 25 m。模型的左右、前后及底边界分别施加 X、Y、Z 向位移约束。隧道横断面宽 × 高为 12 m × 10 m, 模型共 34 080 个单元、36 301 个节点。

围岩、二次衬砌分别采用摩尔-库伦本构模型和弹性本构模型; 隧道开挖采用杀死单元方法模拟; 管棚、注浆小导管和径向锚杆采用梁单元或杆单元

^{*} 基金项目: 2022 年度广西交通运输行业重点科技项目

模拟;初期支护结构采用壳单元模拟。

2.2 围岩与衬砌材料参数

围岩强度参数见表 1,支护结构单元的材料参数见表 2。

表 1 围岩的强度参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 820	弹性模量/GPa	0.53
黏聚力/kPa	13.4	泊松比	0.21
内摩擦角/($^{\circ}$)	18.3	抗拉强度/MPa	0.08

表 2 支护结构单元的材料参数

支护结构	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	材料及尺寸
小导管	3 800.0	120.0	0.30	$\phi 42 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 、长 4.5 m 热轧无缝钢花管
管棚	35.0	114.0	0.30	$\phi 108 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 、长 16 m、环向间距 40 cm 热轧无缝钢管
初期支护	24.5	24.5	0.20	厚度 25 cm 的 C20 混凝土
二次衬砌	25.0	22.5	0.21	厚度 50 cm 的 C25 钢筋混凝土

面轮廓周边围岩主应力较大,拱脚最大及最小主应力分别约为 -0.280 MPa 、 0.965 MPa ;采用环形开挖留核心土法开挖,拱脚最大和最小主应力分别约为 -0.100 MPa 、 0.716 MPa 。在拱脚,CD 法开挖时最大、最小主应力分别为环形开挖留核心土法的

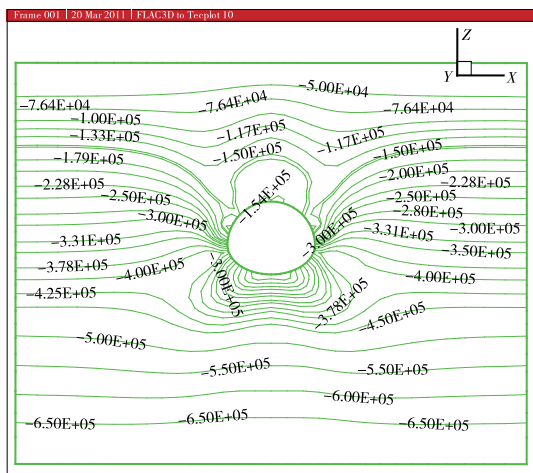
3 数值分析

采用有限差分软件对隧道施工过程中围岩应力、位移变形及塑性破坏情况进行计算,分析 CD 法和环形开挖留核心土法对软弱破碎围岩稳定性的影响,并对比其施工效果。

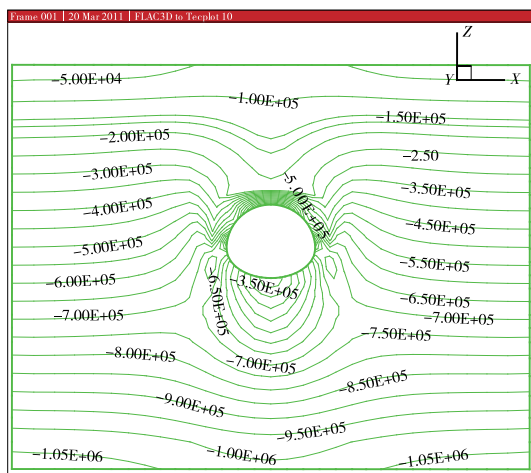
3.1 围岩应力和初期支护弯矩分析

图 2、图 3 分别为采用环形开挖留核心土法和 CD 法开挖后隧道的主应力等值线图(掌子面后方 10 m 处,上下台阶全部开挖)。从图 2、图 3 可以看出:拱脚存在应力集中;采用 CD 法开挖,隧道横断

2.80 倍、1.35 倍。这主要是因为环形开挖留核心土法受核心土长度限制,初期支护闭合时间比 CD 法晚,核心土两侧围岩位移较大,卸荷也较多,导致拱脚应力下降;而采用 CD 法,中隔壁受力及封闭成环早,限制了拱脚围岩位移及应力释放。



(a) 最大主应力等值线图



(b) 最小主应力等值线图

图 2 采用环形开挖留核心土法开挖后隧道主应力等值线图(单位:Pa)

图 4、图 5 分别为上台阶施工时采用环形开挖留核心土法和 CD 法开挖时初期支护的弯矩。从图 4、图 5 可以看出:上台阶施工时,拱脚、拱肩、拱顶及拱底弯矩值较大。环形开挖留核心土法开挖时,最大弯矩出现在拱脚,为 $24.446 \text{ kN} \cdot \text{m}$;CD 法开挖时,最大弯矩出现在拱底,为 $219.350 \text{ kN} \cdot \text{m}$,

拱脚最大弯矩为 $39.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。究其原因,采用 CD 法开挖,隧道断面分为 4 块,各块面积较小,由于支护封闭相对较快,可快速发挥围岩的承拱效应,有效约束围岩变形,拱脚围岩位移和应力释放减少,支护结构承压增大,弯矩较大;采用环形开挖留核心土法开挖时,开挖面积较大,且仰拱距掌子面较远,初

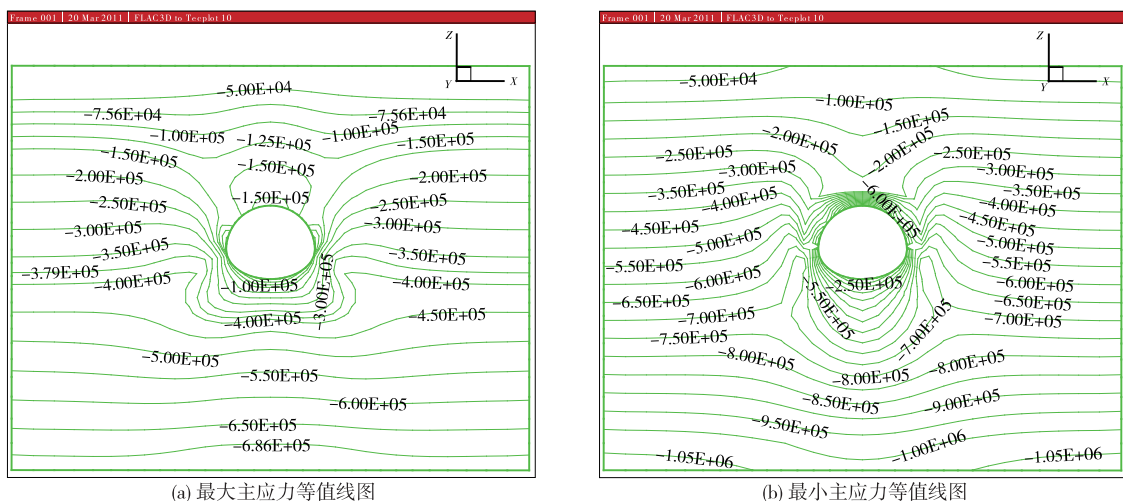
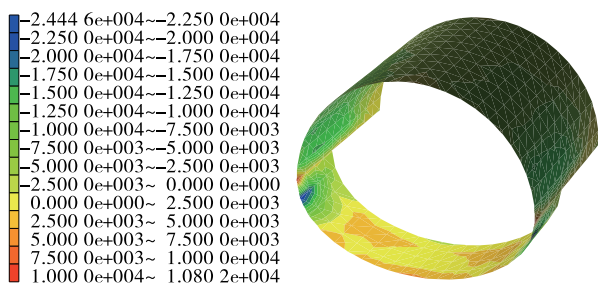
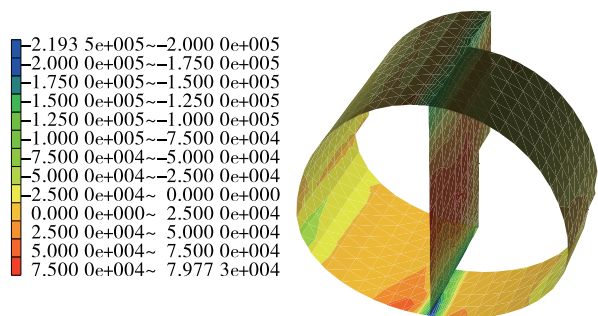


图3 采用CD法开挖后隧道主应力等值线图(单位:Pa)

期支护封闭成环较晚,在极限范围内,围岩允许的位移增加,围岩应力释放较多,支护结构提供的支护反力小,因而初期支护弯矩较小,围岩自承载能力得到充分发挥。

图4 采用环形开挖留核心土法施工时初期支护弯矩图(单位: $\text{N} \cdot \text{m}$)图5 采用CD法施工时初期支护弯矩图(单位: $\text{N} \cdot \text{m}$)

3.2 围岩位移变形分析

图6、图7为采用两种方法开挖时掌子面后方10 m处隧道横断面总位移等值线图。从图6、图7可以看出:采用环形开挖留核心土法开挖时,拱顶最大总位移为0.130 m,总位移主要发生在拱顶上方,且范围大。因为上台阶开挖后,拱顶悬空面积较大,且掌子面和拱顶围岩均处于二维受力状态,对于V级围

岩,其掌子面易发生挤出变形,导致内空位移较大,增加了拱顶向下的位移量,同时仰拱距离掌子面较远,衬砌不能及时封闭成环,围岩暴露时间增大,导致围岩位移较大。采用CD法开挖时,拱顶两侧位移较大,右侧总位移为0.115 m,比左侧总位移(0.010 m)大,但范围较小。这是因为拱顶中央悬空后,易发生围岩松动掉块,但由于CD法施工时先开挖左侧后开挖右侧,且左侧开挖后衬砌支护迅速封闭成环,限制了左侧围岩变形,而右侧未开挖围岩由于在施工中隔壁前约束不够,拱顶产生一定位移,右侧围岩开挖后,发生的累计位移必然比左侧大。说明开挖工序对围岩总位移有影响,在开挖偏压浅埋段时,应合理安排施工顺序,尽量减少不利的总位移。另外,采用环形开挖留核心土法开挖的隧道底部总位移大于CD法,采用CD法开挖有利于控制隧道周边位移。

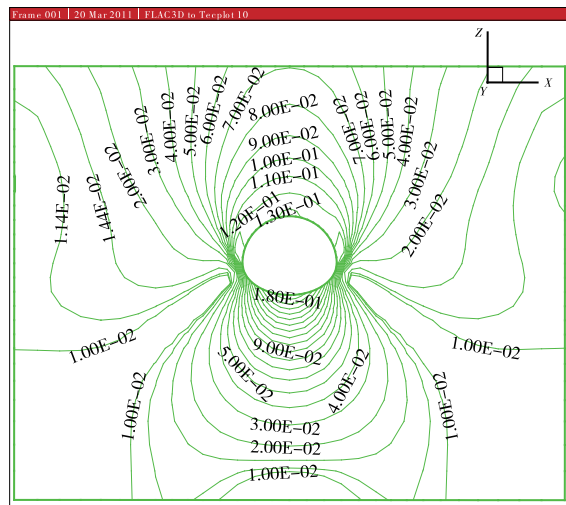


图6 采用环形开挖留核心土法施工时隧道横断面总位移等值线图(单位:m)

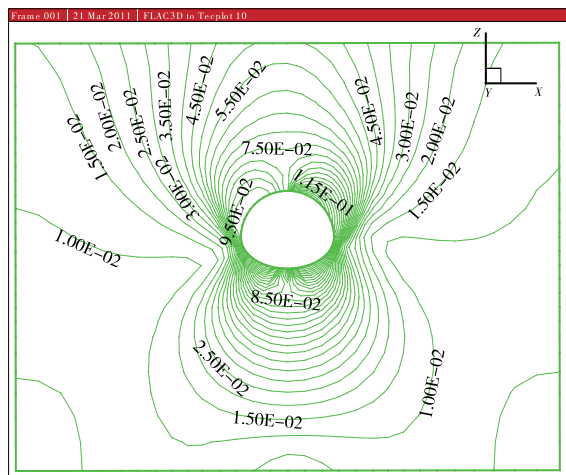


图7 采用CD法施工时隧道横断面总位移等值线图(单位:m)

利用数值方法对掌子面后方 10 m 范围内轴向地表下沉量、平均轴向拱顶下沉量和拱脚 X 向水平位移进行计算,结果如下:采用环形开挖留核心土法开挖时,地表下沉最大值为 6.9 mm,平均轴向拱顶下沉量为 12.3 mm,拱脚 X 向水平位移最大值为 15.1 mm;采用 CD 法开挖时,地表下沉最大值为 5.1 mm,平均轴向拱顶下沉量为 8.3 mm,拱脚 X 向水平位移最大值为 10.5 mm。上述变形都与初期支护的封闭时间相关,封闭时间越晚,变形值越大。

3.3 围岩塑性破坏面积分析

图 8、图 9 分别为采用环形开挖留核心土法与 CD 法开挖时产生的塑性区分布。从图 8、图 9 可以看出:采用环形开挖留核心土法开挖时,塑性区在拱顶及仰拱发展较少,两侧发展较多,拱肩及仰拱拐角处塑性区约为 0.5 倍洞宽;核心土及拱腰至拱脚 1 m 范围内的塑性区为受拉区域,其他为受剪切区域。采用 CD 法开挖时,塑性区在拱顶发展较少,两侧及仰拱发展较多,拱腰及仰拱拐角处塑性区发展约为 0.5 倍洞宽;掌子面及拱脚 1 m 范围内的塑性区以拉伸破坏为主,其他以剪切破坏为主。这是因

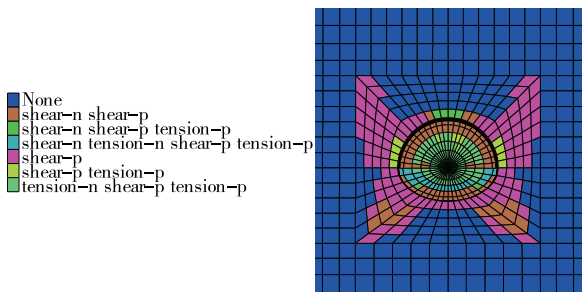


图8 采用环形开挖留核心土法开挖产生的塑性区

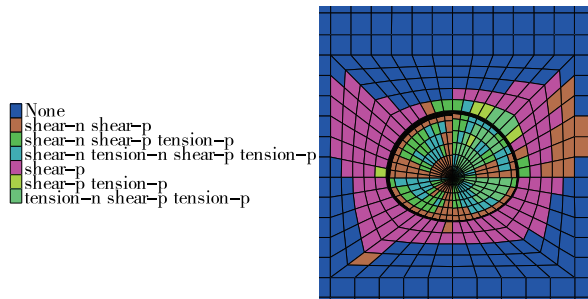


图9 采用CD法开挖产生的塑性区

为采用环形开挖留核心土法开挖对围岩扰动较大,且由于先开挖上台阶,仰拱距掌子面较远,初期支护封闭成环较晚,塑性区在拱顶上部发展较深。

4 结论

相较于环形开挖留核心土法,采用 CD 法开挖具有分块开挖面积较小、围岩扰动较小、仰拱施工及时、初期支护封闭成环早、可显著减少围岩内空位移、提高隧道施工过程中围岩稳定性的优点。环形开挖留核心土法可利用核心土对掌子面的支撑作用,减少掌子面挤出效应。相对而言,CD 法更适合于 V 级围岩隧道的开挖支护。

参考文献:

- [1] 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,2011,31(4):192-196.
- [2] 罗彦斌,石州,陈建勋,等.超大跨度隧道上台阶CD法中隔壁力学计算模型及施工力学行为研究[J].中国公路学报,2020,33(12):235-248.
- [3] 杨成忠,吴宇健,王威,等.大断面软岩隧道开挖空间效应影响分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):511-519.
- [4] 刘玉飞,刘海明,郭伟.基于环形开挖留核心土法的公路隧道围岩应力分析[J].工业安全与环保,2021,47(6):5-9+84.
- [5] 王涵,高永涛,李建旺.隧道穿越断层破碎带施工方案及力学效应研究[J].公路,2021,66(2):316-323.
- [6] 姜封国,白丽丽,宋敏,等.哈尔滨城市地铁大断面隧道施工稳定性分析[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1419-1427.
- [7] 蒲伟斌.双侧壁导坑法在浅埋隧道中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(6):28-30.

收稿日期:2022-11-03