

浅埋软岩大跨度隧道开挖工法研究

朱苦竹^{1,2}, 张书强^{1,2}, 庄瑞鸿^{1,2}

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要 目的 研究浅埋软弱围岩大跨度隧道的开挖工法, 为该类隧道工程的设计和施工提供理论参考. 方法 采用 FLAC^{3D} 有限差分软件, 针对广州某大跨度隧道进口段在双侧壁导坑法、CRD 法和三台阶七步法下的开挖进行数值模拟, 分别对三种工法下的隧道拱顶下沉值、围岩水平位移值、塑性区以及最大和最小主应力进行对比分析. 结果 在控制隧道拱顶下沉和拱脚水平位移及围岩应力集中现象方面, 双侧壁导坑法均优于 CRD 法和三台阶七步法; 在控制围岩塑性区方面, 双侧壁导坑法与 CRD 法相差不大, 但均优于三台阶七步法; 三台阶七步法开挖相比双侧壁导坑法和 CRD 法更容易发生围岩失稳现象. 结论 大跨度隧道浅埋软岩段的开挖不建议采用 CRD 法和三台阶七步法, 而应优先考虑双侧壁导坑法.

关键词 浅埋软岩; 大跨度; 隧道开挖; 工法; 数值计算

中图分类号 TU94⁺1; U455.4

文献标志码 A

Research on the Excavation Method of Large Span Tunnel in Shallow Buried and Soft Rock

ZHU Kuzhu^{1,2}, ZHANG Shuqiang^{1,2}, ZHUANG Ruihong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, China, 541004; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, China, 541004)

Abstract: The excavation method of large span tunnel in shallow buried and soft rock was studied in order to provide theoretical reference for the design and construction of the tunnel engineering. The FLAC^{3D} finite difference software is used to numerical simulate the inlet of a large span tunnel in Guangzhou by the double side drift method, cross diaphragm method (CRD) and three-bench seven-step excavation method. Comparative and analysis the subsidence value of tunnel vault, the horizontal displacement of surrounding rock, plastic zone and the maximum and minimum principal stress under these three kinds of method. The results show that double side drift method is superior to the CRD method and the three-bench seven-step excavation method in controlling the sinking of tunnel vault, horizontal displacement of the arch foot and the stress concentration of the surround-

收稿日期: 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102202)

作者简介: 朱苦竹(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事隧道及地下工程方面研究.

ing rock. Double side drift method is similar to the CRD method, both are superior to the three-bench seven-step excavation method in controlling the plastic zone of the surrounding rock. The three-bench seven-step excavation method is more prone to happen instability phenomenon of the surrounding rock than the double side drift method and CRD method. It is advisable to give priority to use the double side drift method rather than use the CRD method and the three-bench seven-step excavation method of large span tunnel in shallow buried and soft rock.

Key words: shallow buried and soft rock; large span; tunnel excavation; method; numerical calculation

社会发展伴随的交通拥堵,迫使现今公路隧道不得不拓宽车道,原有的单洞二车道与三车道已远远不能满足人们的需要,单洞四车道隧道已经应运而生,逐渐成为大运输量公路的必选。目前我国山岭隧道的开挖方法^[1]主要有:全断面法^[2-4]、台阶法、弧形导坑预留核心土法^[5-6]、中隔壁法、双侧壁导坑法、三台阶七步法等。

近些年来,各学者对隧道工法的研究可谓是不计其数。然而,针对大跨度隧道的工法研究还是不够健全。对于单洞二车道,李浩等^[7]利用有限元法对隧道在双侧壁导坑法下的开挖进行了优化分析。对于单洞三车道,段慧玲等^[8]利用有限元法模拟分析得出了不同围岩等级下隧道的合理开挖方法;龚建伍等^[9]通过有限元法对隧道在双侧壁导坑法、中隔壁法和上下台阶法开挖下的拱顶下沉、地表沉降、中间岩柱应力和围岩稳定性等进行了模拟对比分析。而对于单洞四车道,许崇帮等^[10]利用有限元法对隧道在双侧壁导坑法和CRD法下的开挖进行了模拟分析。蒋坤等^[11]利用离散元模型对隧道在双侧壁导坑法、CRD法和CD法开挖下的拱顶下沉、中间岩柱水平位移、围岩水平位移和围岩塑性区进行了数值分析。

综合看来,单洞四车道隧道工法虽有学者研究,但是工法也只局限在双侧壁导坑法、CD法和CRD法,对于台阶法及其变异法却很少涉及。考虑到三台阶七步法^[12-13],相比双侧壁导坑法^[14]和CRD法^[15-16],成本低,无需临时支护,也不用担心因受力转换造成

施工不安全等优势特点。笔者依托广州某大跨度隧道为工程背景,该隧道是一典型单洞四车道公路隧道,隧洞桩号为K5+765~K6+775,全长1 010 m;开挖洞宽为19~20.8 m,洞高为11~14 m,最大开挖断面面积达218 m²,属超大断面大跨度隧道。采用FLAC^{3D}有限差分软件^[17],对隧道进口段在双侧壁导坑法、CRD法和三台阶七步法三种工法下的拱顶下沉值、围岩水平位移值、塑性区以及最大和最小主应力进行对比分析,以期完善单洞四车道隧道工法的研究,得出更佳的开挖方法,为该隧道的设计和现场施工提供参考。

1 隧道开挖数值模拟

1.1 模型的建立

计算模型(见图1)选取进口段K5+810断面数据作为设计依据,模型的左右和下边

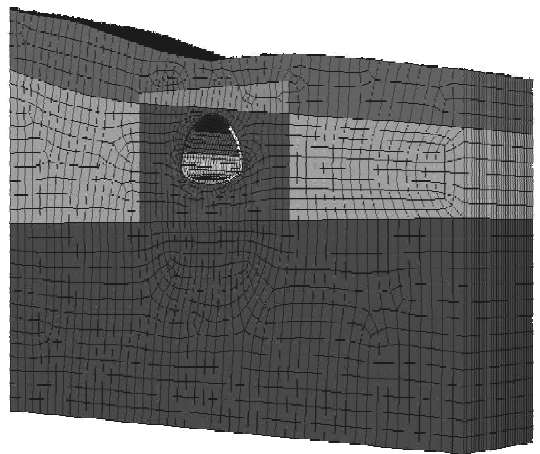


图1 隧道计算模型

Fig. 1 Tunnel calculation model

界均取至隧道跨度和宽度的3倍洞径^[18-19],上边界取至地表,纵向取30 m.模型的左右两侧边界设置为水平约束,下边界为竖向约束,上边界为自由面.隧道拱顶距地表10 m,为浅埋隧道.

围岩材料选用弹塑性本构模型,采用Mohr-Coulomb屈服准则.初始地应力场采用更改强度的弹塑性求解法^[20],由围岩自重形成.支护材料选用弹性模型.其围岩和支护结构的物理力学参数取值详见表1.

表1 围岩和支护结构物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure

围岩和支护结构	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\Phi/(\text{°})$
残坡积土(VI级)	1 700	0.14	0.38	20	20
全~强风化花岗岩(V级)	1 900	0.25	0.35	50	25
弱~微风化花岗岩(IV级)	2 300	1.30	0.30	300	30
初衬	2 300	31	0.20	—	—
二衬	2 500	32	0.20	—	—
临时支护	7 850	200	0.31	—	—
超前支护	2 300	3.60	0.30	—	—

1.2 开挖工步序模拟方案

笔者采用双侧壁导坑法、CRD法以及三台阶七步法进行模拟开挖比较分析,3种开挖方案的工序分别如下:

双侧壁导坑法:①开挖左导洞上台阶,再施工其初衬和临时支护;②开挖左导洞下台阶,再施工其初衬和临时支护;③开挖右导洞上台阶,再施工其初衬和临时支护;④开挖右导洞下台阶,再施工其初衬和临时支护;⑤开挖核心土上部,再施工其初衬;⑥开挖核心土中部,再施工其临时支护;⑦开挖核心土下部,再施工其初衬;⑧拆除临时支护,再施工全环二衬(见图2).

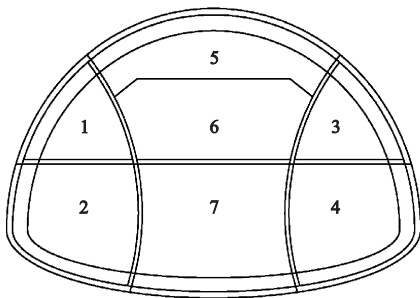


图2 双侧壁导坑法

Fig. 2 Double side drift method

CRD法:①开挖左导坑上部,再施工其初衬和临时支护;②开挖左导坑下部,再施工其初衬和临时支护;③开挖右导坑上部,再施工其初衬和临时支护;④开挖右导坑下部,再施工其初衬;⑤拆除临时支护,再施工全环二衬(见图3).

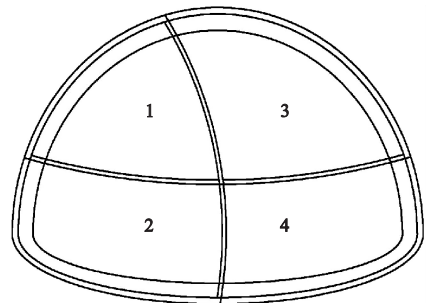


图3 CRD法

Fig. 3 CRD method

三台阶七步法:①先施工超前支护,然后开挖上弧型导航,再施工初衬;②开挖中导洞左上边墙,再施工其初衬;③开挖中导洞右上边墙,再施工其初衬;④开挖中导洞左下边墙,再施工其初衬;⑤开挖中导洞右下边墙,再施工其初衬;⑥依次开挖中导洞核心土上、中、下台阶;⑦开挖仰拱,再施工其初衬,最后

施工全环二衬(见图 4).

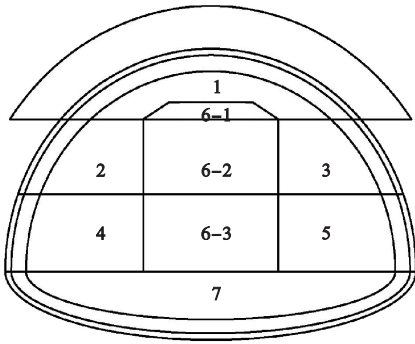


图 4 三台阶七步法

Fig. 4 Three-bench seven-step excavation method

1.3 监测点布置

3 种工法下的隧道开挖模型均参考实际隧道施工监测断面布置图(见图 5),在拱顶设置了 P_1 、 P_3 和 P_5 监测点.

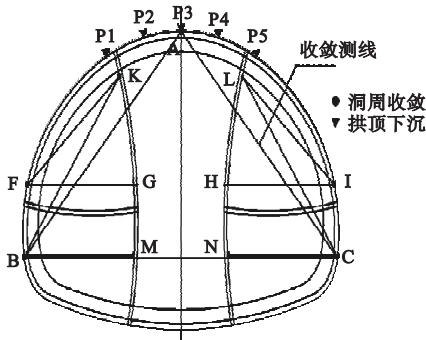


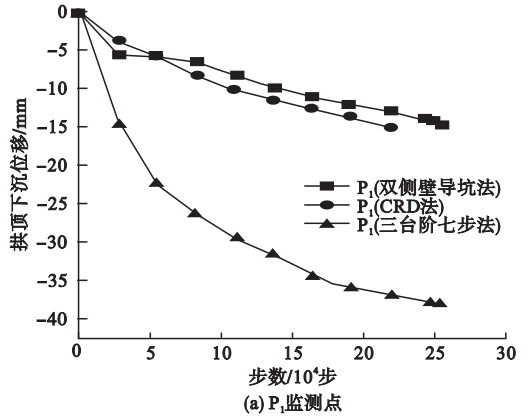
图 5 施工监测断面布置图

Fig. 5 Layout of construction monitoring section

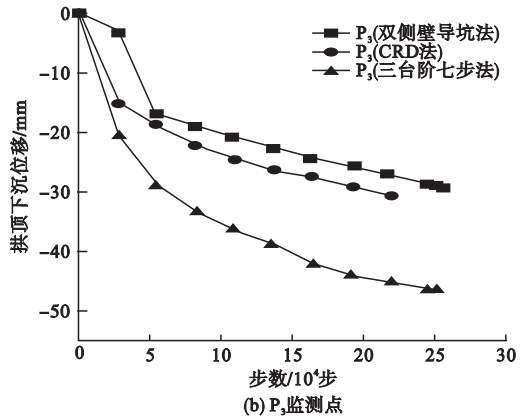
2 结果对比分析

2.1 拱顶下沉

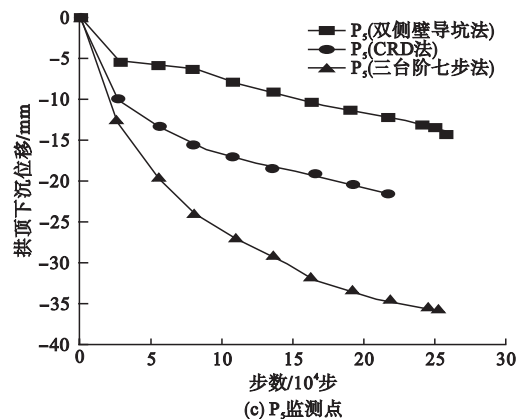
根据监测结果可知各工法最终产生的拱顶下沉值分别有:双侧壁导坑法为 14.97 mm (P_1)、29.63 mm(P_3)、14.31 mm(P_5),CRD 法为 15.06 mm (P_1)、30.84 mm (P_3)、21.79 mm(P_5),而三台阶七步法的下沉值为 37.95 mm(P_1)、46.52 mm(P_3)、35.73 mm(P_5) 各工法下拱顶监测点 P_1 、 P_3 和 P_5 随时步的下沉曲线如图 6 所示.



(a) P_1 监测点



(b) P_3 监测点



(c) P_5 监测点

图 6 各工法下的拱顶下沉曲线

Fig. 6 Vault subsidence curves by each method

综合对比图 6(a)、(b)和(c)可知:拱顶 P_1 、 P_3 和 P_5 监测点的下沉值在双侧壁导坑法开挖下是最小的,三台阶七步法下是最大的,CRD 法下则位居中间;以监测点 P_3 为例,将双侧壁导坑法下的拱顶下沉值作为基准,CRD 法和三台阶七步法开挖引起的拱顶下沉值比双侧壁导坑法分别增大了 4.1% 和 57%;在最初的 25 000 循环步内,CRD 法和

三台阶七步法开挖造成的拱顶下沉值分别占其最终沉降的49.4%和44.4%,而双侧壁导坑法却微小的多,只有11.3%。

图7为实测隧道在双侧壁导坑法开挖下拱顶监测点 P_1 和 P_5 随时间的下沉变化曲线。由实测数据知最终拱顶下沉值为14.7 mm(P_1), 18.25 mm(P_5), P_3 数据缺失。

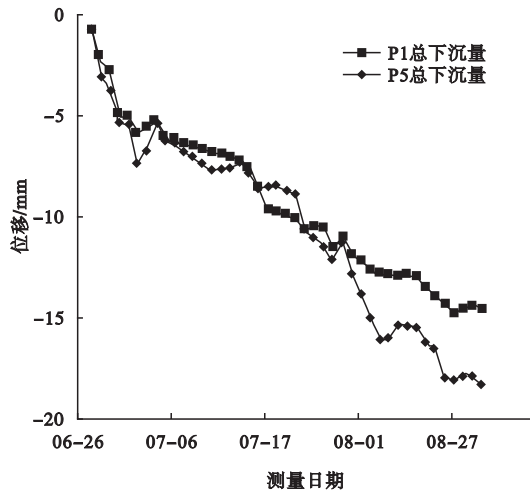


图7 实测隧道拱顶下沉曲线

Fig.7 The measured tunnel vault subsidence curve

将这3种工法下的模拟监测值与实测值进行对比可知:双侧壁导坑法 P_1 处的模拟监测值略大于实测值, P_5 处模拟监测值小于实测值;CRD法的 P_1 和 P_5 处的模拟监测值均大于实测值;而三台阶七步法的 P_1 和 P_5 模拟值均大于实测值。

由此能断定,在控制拱顶下沉方面,双侧壁导坑法优于CRD法和三台阶七步法。

2.2 围岩水平位移

图8是3种工法下的最终隧道围岩水平位移图。对比图8(a)、(b)和(c),不难发现,三者洞周水平位移的由小到大基本排序为双侧壁导坑法,CRD法,三台阶七步法。查看模拟结果可知:3种工法下拱脚处水平位移有:双侧壁导坑法为-1.378 mm(左侧)、1.437 mm(右侧),CRD法为-1.808 mm(左侧)、1.214 mm(右侧),三台阶七步法为

-5.036 mm(左侧)、4.675 mm(右侧);对比可知拱脚处水平位移在双侧壁导坑法开挖下最小,在三台阶七步法下最大。由实测数据知拱脚处水平位移为-5.27 mm(左侧)、3.87 mm(右侧),与三台阶七步法下的最为接近。

综上所述,单就模拟结果而言,在控制洞周水平位移方面,双侧壁导坑法也相对优于CRD法和三台阶七步法。

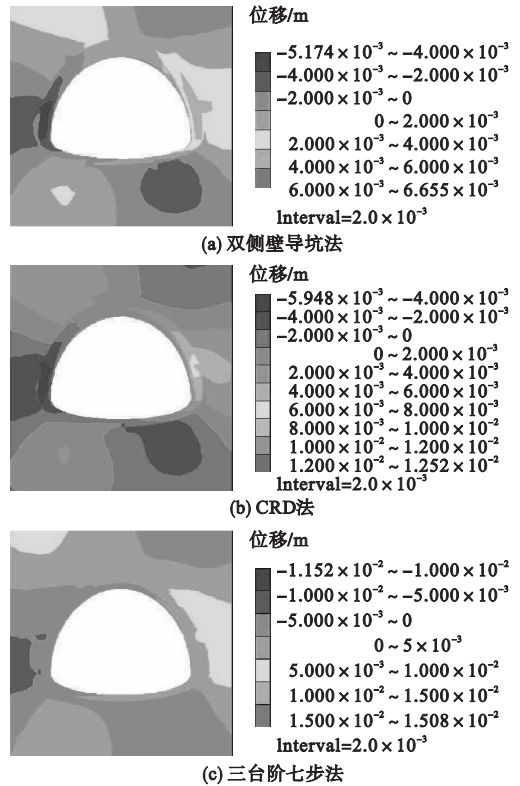


图8 各工法下围岩水平位移

Fig.8 Horizontal displacement of surrounding rock based on each method/m

2.3 围岩塑性区

隧道在开挖的过程中,必然会引起围岩应力的重分布,其中部分围岩因发生应力集中现象,导致围岩应力超过其屈服强度,从而产生不可恢复的屈服区域,形成围岩塑性区。图9为3种工法开挖模拟下的围岩塑性区。图中 n 表示现在, p 表示曾经。

据图9可知:在洞室开挖完成后,双侧壁导坑法和CRD法下的塑性区分布规律大体

一致,塑性区范围也相差不大,其主要都是集中在地表、洞身顶部、腰部和底部;三台阶七步法除了因核心土上部施加了超前支护,致使洞身顶部几乎未出现塑性区外,而地表、洞身腰部和底部相比前两种工法下的塑性区范围均大,尤其是两侧拱脚处,三台阶七步法下的塑性区则更大。

因大跨度隧道浅埋软岩段开挖断面大,且各开挖部分之间干扰明显,三台阶七步法没有像双侧壁导坑法和 CRD 法一样,在开挖过程采用中隔墙等临时支护,故围岩稳定性必然是要差一些,也更容易屈服,模拟结果也证实了这一点。

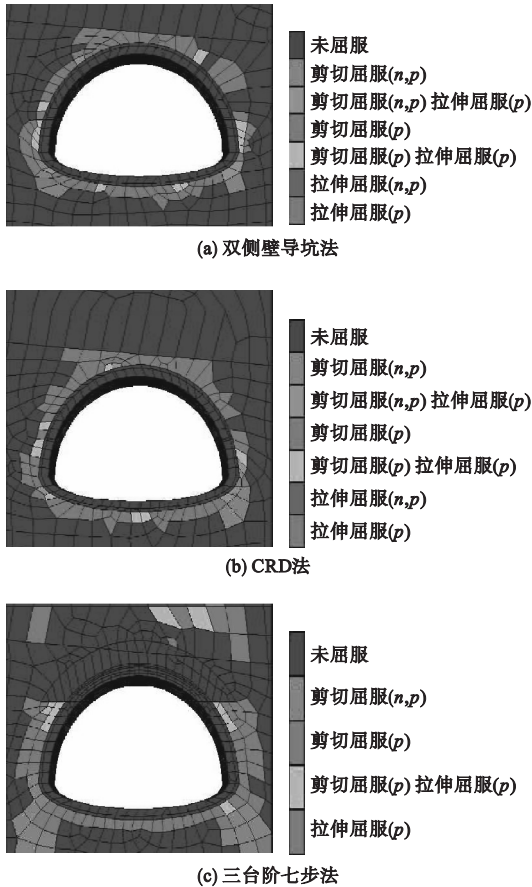


图 9 围岩塑性区分布图

Fig. 9 Distribution map of surrounding rock plastic zone

由此表明:三台阶七步法无需拆除临时支护,也无需担心因受力转换造成施工不安

全的优势特点在大跨度隧道浅埋软岩段是难以体现的;单从洞室开挖后的塑性区范围来判别开挖工法的优劣,则可得出双侧壁导坑法和 CRD 法要明显优于三台阶七步法。

2.4 围岩应力

图 10 为 3 种工法开挖完成后的最大主应力. 通过模拟结果得知:以隧道左拱脚处的最大主应力为例,双侧壁导坑法为 0.401 MPa,CRD 法为 0.475 MPa,三台阶七步法为 0.525 MPa。

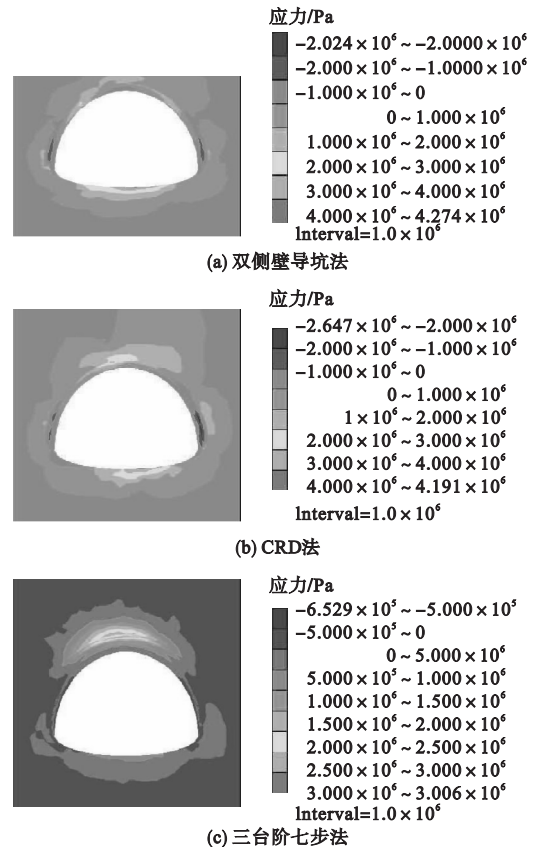


图 10 各工法下的最大主应力

Fig. 10 The maximum principal stress based on each method

图 11 为 3 种工法开挖完成后的最小主应力. 由模拟结果可知:同样以隧道左拱脚处的最小主应力为例,双侧壁导坑法的最小主应力为 -12 MPa;CRD 法的最小主应力为 -15.8 MPa;三台阶七步法的最小主应力为 -19 MPa。

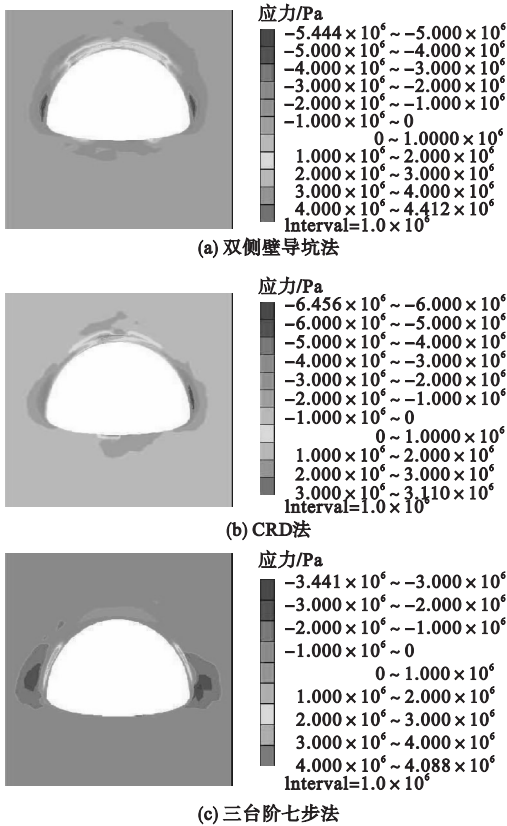


图 11 各工法下的最小主应力

Fig. 11 The maximum principal stress based on each method

由此可得出:不论是最大主应力还是最小主应力,三台阶七步法下的左拱脚处应力值都是最大的;且应力集中分布范围也均为三台阶七步法比 CRD 法明显,CRD 法比双侧壁导坑法明显.这说明,在大跨度隧道浅埋软弱围岩段施工时,采用三台阶七步法相比其他两种工法更容易发生围岩失稳现象.

3 结论

(1)在控制大跨度隧道浅埋软岩段的拱顶下沉和洞周水平位移方面,双侧壁导坑法要优于 CRD 法和三台阶七步法;在控制围岩塑性区范围方面,双侧壁导坑法和 CRD 法没有显著差别,但是均明显优于三台阶七步法.

(2)对于大跨度隧道浅埋软岩段,采用三台阶七步法施工相比双侧壁导坑法和 CRD 法更容易发生围岩失稳现象.

(3)基于三台阶七步法、双侧壁导坑法和 CRD 法的特点,并结合笔者的分析以及实际隧道工程在双侧壁导坑法下开挖的数据资料,得出 CRD 法和三台阶七步法并不适用于大跨度隧道浅埋软岩段.而对于类似浅埋软岩隧道段,建议优先采用双侧壁导坑法,能取得较好结果.

参考文献

- [1] 徐昌茂. 基于围岩稳定性与超前地质预报的高铁隧道钻爆开挖工法转换条件研究[D]. 武汉:中国地质大学,2015. (XU Changmao. Study on excavation conversion condition by drilling and blasting method for high-speed railway tunnel based on surrounding rock stability analysis and advanced geological prediction information[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2015.)
- [2] BARLA G. Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering,2016, 8(6):294-303.
- [3] HISATAKE M, OHNO S, KATAYAMA T, et al. Effects of the ring-cut excavation method on the restraint of displacements ahead of a tunnel face[J]. Tunnelling and underground space technology,2009,24(9):547-554.
- [4] TONON F. ADECO full-face tunnel excavation of two 260m² tubes in clays with sub-horizontal jet-grouting under minimal urban cover[J]. Tunnelling and underground space technology, 2011,26(3):253-266.
- [5] YOO C. Performance of multi-faced tunneling-A 3D numerical investigation[J]. Tunnelling and underground space technology, 2009, 24(9):562-573.
- [6] FANG Qian, ZHANG Dingli, WONG L N Y. Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground[J]. Tunnelling and underground space technology,2012, 29(5):10-30.
- [7] 李浩,韩立军,孟庆彬,等. V级围岩二车道隧道双侧壁导坑法优化分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(6):118-125. (LI Hao, HAN Lijun, MENG Qingbin, et al. Optimization of the double-side-drift method for a two-lane tunnel in surrounding rock of grade V[J]. Modern tunnelling technology, 2015,52(6):118-125.)

- [8] 段慧玲,张林.大跨度公路隧道合理开挖方法对比研究[J].土木工程学报,2009,42(9):114-119.
(DUAN Huiling, ZHANG Lin. Comparative study of rational excavation methods for large-span highway tunnels[J]. China civil engineering journal, 2009, 42(9): 114-119.)
- [9] 龚建伍,夏才初,朱合华,等.鹤上大断面小净距隧道施工方案优化分析[J].岩土力学,2009,30(1):236-240.
(GONG Jianwu, XIA Caichu, ZHU Hehua, et al. Optimal analysis of construction schemes for Heshang small-space tunnels with large section[J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(1): 236-240.)
- [10] 许崇帮,夏才初,朱合华.双向八车道连拱隧道施工方案优化分析[J].岩石力学与工程学报,2009,30(1):66-73.
(XU Chongbang, XIA Caichu, ZHU Hehua. Optimum analysis of construction scheme of ultri-arch tunnel with eight traffic lanes[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 30(1): 66-73.)
- [11] 蒋坤,夏才初,卞跃威.节理岩体中双向八车道小净距隧道施工方案优化分析[J].岩土力学,2012,33(3):841-847.
(JIANG Kun, XIA Caichu, BIAN Yuewei. Optimal analysis of construction schemes of small space tunnel with bidirectional eight traffic lanes in jointed rock mass[J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(3): 841-847.)
- [12] 王晓州.大断面黄土隧道建设技术[M].北京:中国铁道出版社,2009.
(WANG Xiaozhou. Construction technology for loess tunnels with large cross section[M]. Beijing: China Railway Press, 2009.)
- [13] LI Pengfei, ZHAO Yong, ZHOU Xiaojun. Displacement characteristics of high-speed railway tunnel construction in loess ground by using multi-step excavation method[J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 51(1): 41-55.
- [14] SHARIFZADEH M, KOLIVAND F, GHORBANI M, et al. Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground-Niayesh tunnel[J]. Tunnelling and underground space technology, 2013, 35(4): 178-188.
- [15] FANG Qian, LIU Xiang, ZHANG Dingli, et al. Shallow tunnel construction with irregular surface topography using cross diaphragm method[J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 68(9): 11-21.
- [16] JIANG Annan, LI Peng, SHI Hongtao. Shallow depth of the tunnel excavation response research based on CRD method[J]. Procedia engineering, 2011, 15(8): 4852-4856.
- [17] 金生吉,李宁,芮勇勤,等.隧洞开挖过程中爆破振动力学特性研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(1):66-71.
(JIN Shengji, LI Ning, RUI Yongqin, et al. Research on mechanical characteristics of blasting vibration during tunnel excavation[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(1): 66-71.)
- [18] 唐明明,王芝银,李云鹏.穿越公路偏压小净距隧道施工方法探讨[J].岩土力学,2011,32(4):1163-1168.
(TANG Mingming, WANG Zhiyin, LI Yunpeng. Study of construction methods for crossing bias small interval highway tunnel[J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(4): 1163-1168.)
- [19] LI Yayong, JIN Xiaoguang, Lü Zhitao, et al. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel[J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 56(1): 22-33.
- [20] 郭运华,朱维申,李新平,等.基于FLAC^{3D}改进的初始地应力场回归方法[J].岩土工程学报,2014,36(5):892-898.
(GUO Yunhua, ZHU Weishen, LI Xiping, et al. Improved regression method for initial geostress based on FLAC^{3D}[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(5): 892-898.)