

文章编号: 1000-7598-(2007)增刊-0430-07

软岩浅埋隧道施工工法比选

王伟锋¹, 毕俊丽²

(1. 北京城建设计研究总院, 北京 100037; 2. 中铁隧道勘测设计院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 目前在高速公路软岩浅埋隧道施工中均不同程度地出现了围岩坍塌、地表产生大面积沉降等问题。广福隧道某浅埋段, 地质条件复杂, 断面大、岩性差, 受构造影响比较严重, 而且顶板厚度比较薄, 易发生坍塌、冒顶现象。为确保浅埋段隧道的施工安全, 尽量减少隧道开挖引起的地层沉降和围岩变形, 采用 FLAC^{3D} 对 4 种施工工法全断面法、短台阶法、单侧壁导坑法和双侧壁导坑法进行模拟, 分析了 4 种工法下地表沉降、隧道围岩周边位移和塑性区的变化特点, 选出一种技术可行、经济合理的施工工法, 得出一些有意义的结论。

关键词: 软岩; 浅埋隧道; 施工工法; 数值模拟

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Construction project optimizing of soft rock and shallow buried tunnel

WANG Wei-feng¹, BI Jun-li²

(1. Beijing Urban Engineering Design and Research Institute, Beijing 100037, China;

2. China Railway Tunnel Survey and Design Institute, Luoyang 471009, China)

Abstract: Recently many problems such as surrounding rock collapse, large-area settlement of ground surface etc have happened during soft rock and shallow buried tunnel construction of express highway. The stratum condition of a shallow buried zone of Guangfu Tunnel is very complex. The section is large and the lithology is weak. The action of conformation has much influence on the shallow buried zone. And its top length is very thin. It is very easy to cause cave-in collapse and fall of ground. In order to ensure the construction safety of shallow buried zone tunnels and reduce the stratum settlement and surrounding rock deformation caused by the excavation of tunnels, four construction projects are simulated by FLAC3D as much full section method, shot shoulder method, unilateral pilot tunnel method and double pilot tunnel method. The variation feature of ground surface settlement, surrounding rock circumjacent displacement and plastic zone during the four excavation projects are analyzed. These four construction projects are computed with finite element method. Some valuable conclusions are drawn: (1) the double pilot tunnel method may produce fewer vertical displacements and horizontal convergence and its stabilization is better. (2) the plastic zone radius for double pilot tunnel method is least. (3) it is the most reasonable that double pilot tunnel method is adopted in the shallow buried zone of Guangfu Tunnel.

Key words: soft rock; shallow buried tunnel; construction projects; numerical simulation

1 工程概况

广福隧道某浅埋段 (Lk7+800~Lk7+880) 见图 1, 长 80 m, 隧道断面大, 岩性差, 地质条件复杂, 多为弱风化花岗岩体, 局部为偏强风化状。岩体波速 $V_p = 2\ 700 \sim 3\ 000$ m/s, 由于该段受构造影响比较严重, 而且顶板厚度比较薄, 易发生坍塌、冒顶现象, 故围岩类别定为 II 类。该段埋深较浅, 平均埋深为不足 20 m, 最大埋深为 30 m, 而且左线外侧

紧邻一水沟, 地势较低。

如何选择合理的施工方法, 确保隧道的施工安全是该隧道修建中必须解决的关键技术。因此对多种施工工法进行数值模拟计算和分析, 以便选择更为安全可靠与经济合理的施工方法。

2 隧道模型和计算参数

本文采用国际上通用的有限元计算程序 ANSYS 建立有限元模型, 采用岩土地下工程专用

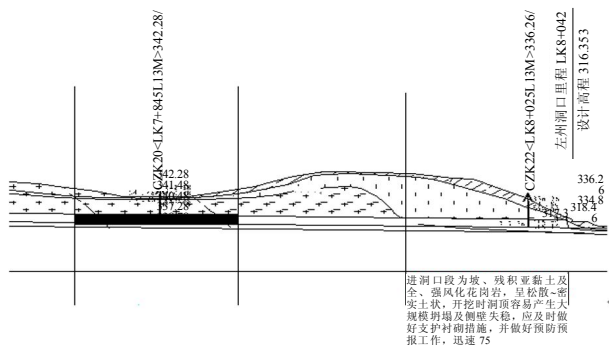


图1 广福隧道模拟段纵断面图(单位: m)
Fig.1 Simulated zone skiagraph of Guangfu Tunnel(unit: m)

结构分析软件FLAC^{3D}, 进行结构计算分析。

2.1 隧道模型

为了分析上述施工方法对隧道开挖时围岩变形及其支护结构受力状态的影响, 数值计算中采用三维有限元地层结构模型, 共采用两种模型, 仅双侧壁导坑法采用模型2, 其余采用模型1, 只是工序有所差别, 如图2所示。

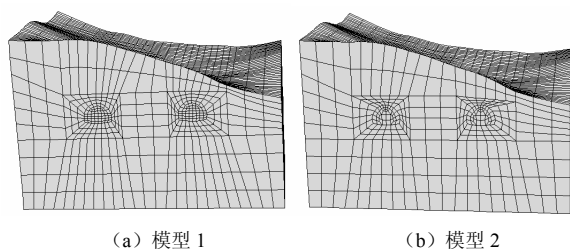


图2 隧道计算模型
Fig.2 Computing model of the tunnel

为便于对比, 在模拟大跨度隧道开挖过程时, 4种方法均采用相同尺寸、地层参数、计算参数以及相同边界约束条件的有限元模型, 而区别仅在于所采用的施工工艺和开挖顺序不同。

2.2 模型范围

该段左右线隧道平均间距仅为31 m, 故模型中同时考虑了左右线两个隧道。水平方向长度为洞跨的6倍, 长124 m; 垂直方向隧道到底部边界为洞径的6倍, 即40 m; 纵向长度取80 m范围; 上部为模拟地表起伏的自由边界; 模型左、右、前、后和下部边界均施加法向约束, 地表未受任何约束^[1]。

2.3 单元

围岩均采用8节点六面体实体单元加以模拟, 对于双侧壁导坑法划分了14 480个三维单元, 其余工法此段模型共划分了17 680个三维单元。根据隧道初步设计资料确定喷射混凝土和锚杆的位置和力学参数。喷射混凝土采用shell单元, 锚杆采用cable单元^[2]。

2.4 计算参数

计算采用三维弹塑性分析, 围岩材料采用摩尔-库仑模型, 喷射混凝土采用弹性材料。衬砌和围岩的物理力学参数根据规范^[3]中岩体工程分类标准建议的力学参数确定。锚杆采用 $\phi 22$ mm中空注浆锚杆, $L=3.0$ m, $@100 \times 100$ cm; 初期支护隧道周围喷20 cm的C20早强混凝土。表1为计算中采用的力学参数。

表1 计算力学参数
Table 1 Computing-mechanical parameters

类别	重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 /GPa	泊松比	凝聚力 /MPa	内摩擦角 / (°)
围岩	18.5	1.5	0.4	0.1	23.5
C20 混凝土	22	17.5	0.2	—	—

3 隧道开挖数值模拟

计算时岩体初始应力场仅考虑自重应力场的作用。隧道初期支护只考虑锚杆和喷射混凝土的作用, 二次衬砌仅作为安全储备, 在此不参与计算。

3.1 初始应力场

首先计算岩体在自重应力场和构造应力场^[4]的作用下, 达到平衡, 得应力场如图3所示, 而后进行开挖模拟。

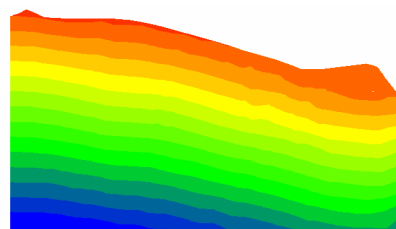


图3 初始应力场云图
Fig.3 Initial stress contour

3.2 开挖工序

对于模拟的所有工法, 当前均考虑左右线错开20 m距离开挖。另外, 隧道施工时支护总是滞后开挖一段时间, 在此以支护滞后两个开挖步(即滞后4 m)来体现。由于计算量偏大, 仅就前40开挖步进行分析, 每开挖步为2 m, 循环400时步。下面对各种施工方法^[5]的模拟计算工序分别介绍(见图4)。

3.2.1 全断面法施工开挖步骤

全断面法施工工序如下:

(1) 全断面开挖; (2) 锚喷支护。

3.2.2 短台阶法施工开挖步骤

短台阶法施工工序如下:

(1) 上台阶开挖; (2) 拱部锚喷支护; (3) 下台阶开挖; (4) 边墙、仰拱锚喷支护。

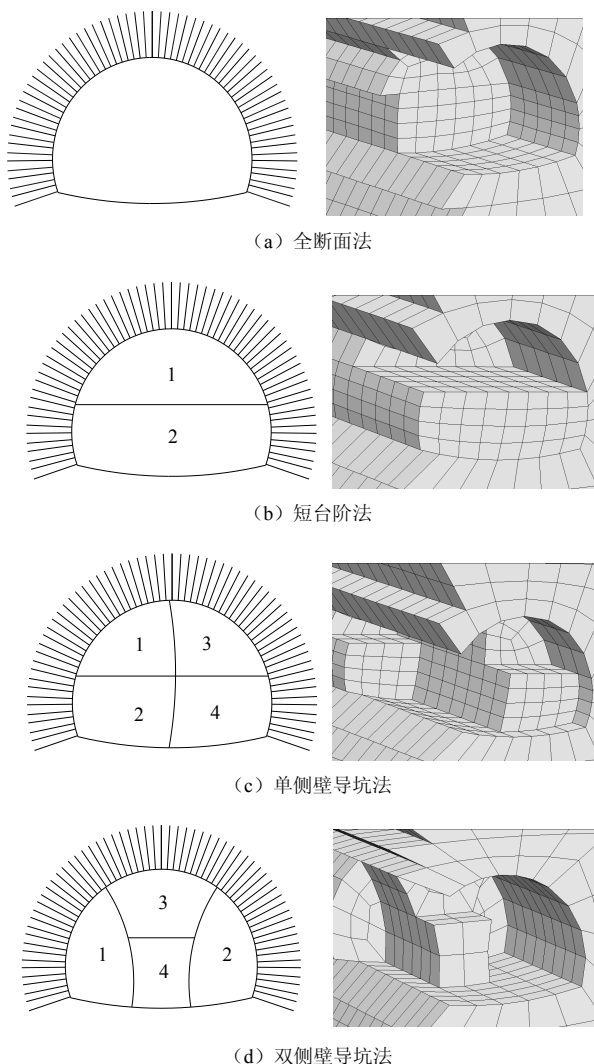


图4 开挖工序图

Fig.4 Excavation subsequence

模拟计算中上下台阶错距为 10 m。

3.2.3 单侧壁导坑法施工开挖步骤

单侧壁导坑法施工工序如下：

(1) 左侧导坑上下分部开挖；(2) 左幅锚喷支护；(3) 右侧导坑上下分部开挖；(4) 右幅锚喷支护。

左、右幅开挖保持 10 m 错距，左侧导坑超前，两侧各上下分部错距 4 m。

3.2.4 双侧壁导洞法施工开挖步骤

双侧壁导洞法施工工序如下：

(1) 左侧导洞开挖并锚喷左边墙及左侧仰拱；(2) 右侧导洞开挖并锚喷右边墙及右侧仰拱；(3) 上部核心土开挖并锚喷拱部；(4) 下台阶开挖并锚喷中底部仰拱。

左导洞和右导洞开挖保持 4 m 错距，右导洞和上部核心土开挖保持 4 m 错距，上部核心土与下台阶开挖保持 4 m 错距，左右线错开 10 m。

4 计算结果分析

通过模拟计算分析，考察隧道动态施工触发围岩的位移、应力和塑性区的特性及其对隧道结构的影响，为工程提供建议的施工方法。对这几种施工方法的模拟结果包括围岩的位移和塑性区。

4.1 隧洞围岩位移场分析

首先，分析模型中的左洞室（实际为右线隧洞）进深为 5 m（即 $Y = 5$ m）与右洞室（实际为左线隧洞）进深为 5 m（即 $Y = 5$ m）时的断面处位移场；其次分析整个模型 $Y = 2$ m 处的横向沉降槽和左右线地表纵向沉降槽，并通过这些数据对 4 种工法进行比较。

4.1.1 围岩竖向位移

采用 4 种工法时隧洞竖向位移场如图 5 所示。

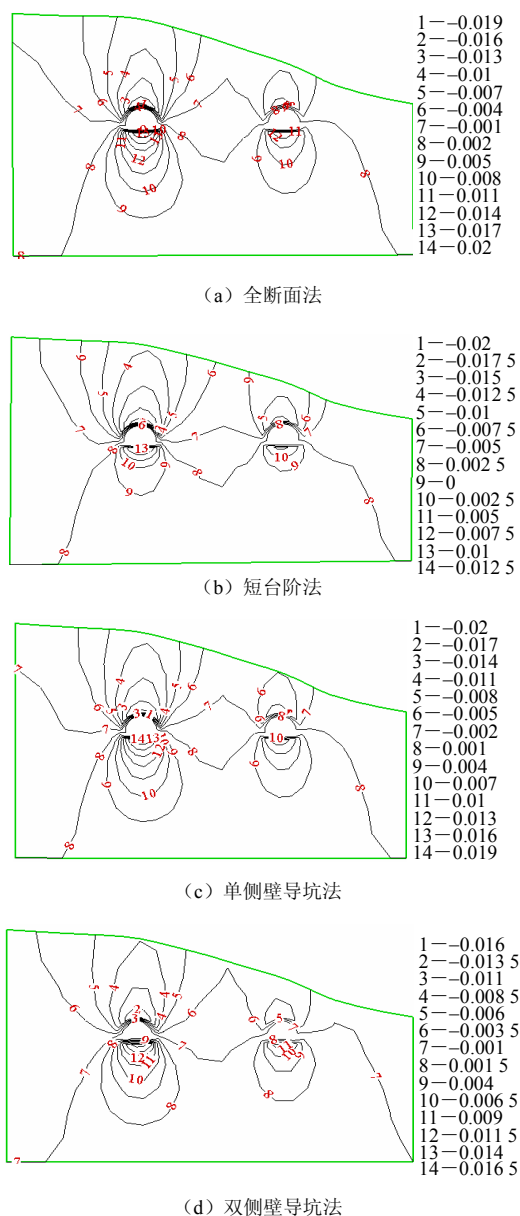


图5 竖向位移云图（单位：m）

Fig.5 Contour of vertical displacement(unit: m)

将4种工法模拟计算至40步时所得的左线 $Y=5\text{ m}$ 断面及右线 $Y=5\text{ m}$ 断面处隧洞拱顶下沉、底部隆起和地表下沉绘成曲线,进行直观地比较,如图6、图7所示。

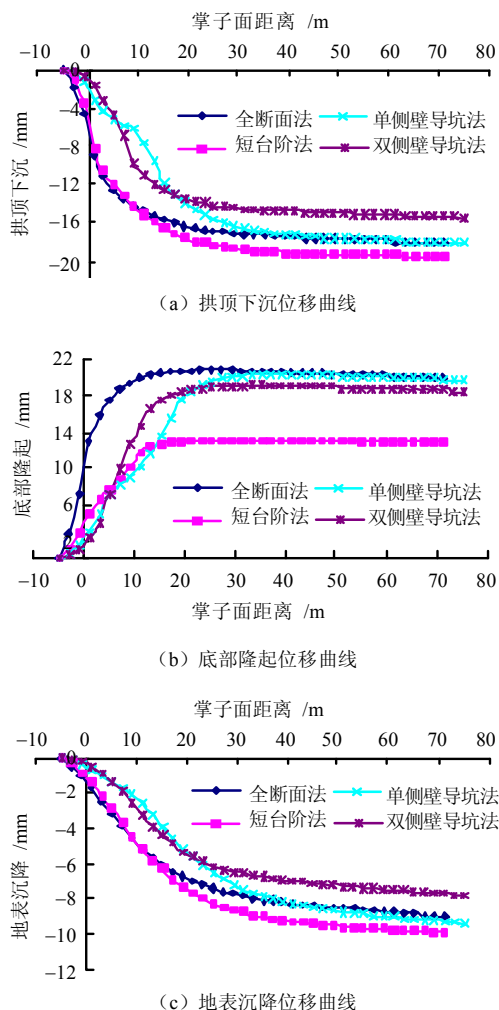


图6 左线 $Y=5\text{ m}$ 断面竖向位移曲线
Fig.6 Vertical displacement curves of light of $Y=5\text{ m}$

采用双侧壁导坑工法时围岩竖向位移明显要小于其他工法。

(1) 采用全断面工法时,开挖引起的底部隆起为最大,拱顶下沉和地表沉降也比较大,而且开挖至模拟监测断面时位移量增加非常快,这就给初期支护提出了较高的要求。

(2) 采用短台阶段时得到的拱顶下沉和地表沉降值均大于其他工法所得值,但开挖引起的底部隆起却远小于其他工法,最大值仅为全断面法的0.6,也只为双侧壁导坑法的0.7,详见表2。

(3) 采用双侧壁导坑法时得到的底部隆起虽大于台阶段,但明显要小于其他3种工法所得,且其所得最大拱顶下沉量和地表下沉量要比其他3种工法小得多,约为其他工法的0.75~0.85倍,详见表2。

(4) 除全断面法外,其余工法均采用了分步开

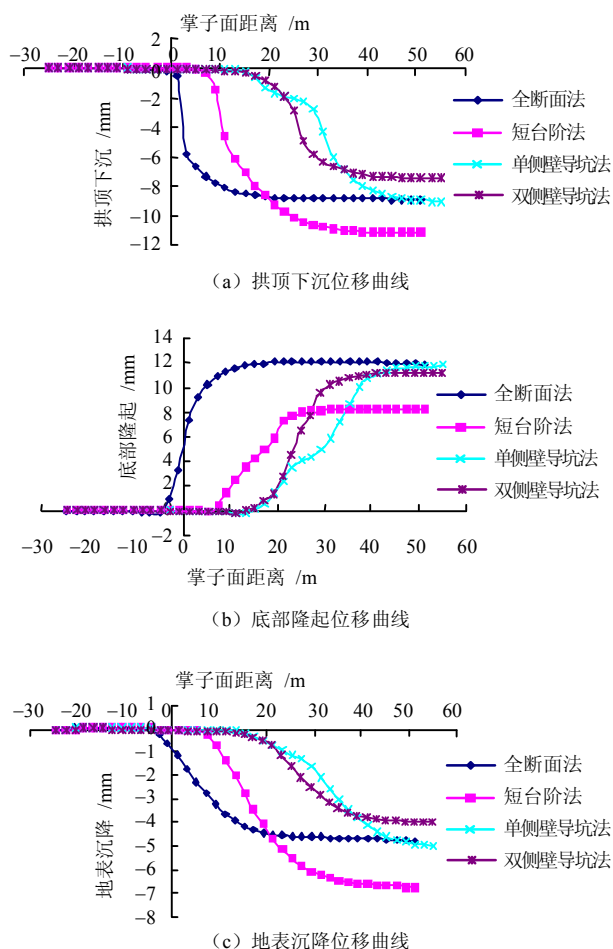


图7 右线 $Y=5\text{ m}$ 断面竖向位移曲线
Fig.7 Vertical displacement curves of right of $Y=5\text{ m}$

表2 最大竖向位移/mm
Table 2 Maximum of vertical displacement

部位	洞室	y/m	施工方法			
			全断面法	短台阶段	单侧壁导坑法	双侧壁导坑法
拱顶	左	5	-18.10	-19.49	-18.09	-15.43
下沉	右	5	-9.00	-11.16	-9.03	-7.40
底部	左	5	20.82	13.11	20.35	19.11
隆起	右	5	12.07	8.14	11.73	11.19
地表	左	5	-9.02	-9.88	-9.38	-7.81
下沉	右	5	-4.77	-6.74	-4.99	-3.97

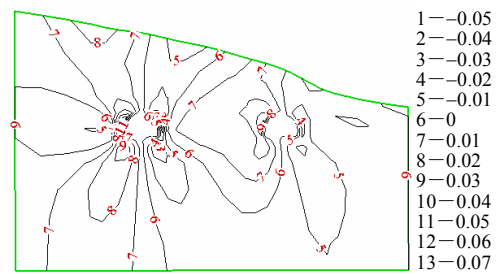
挖方式,但从图中各曲线可以看到,双侧壁导坑法得到的位移曲线台阶特性要较其他3种工法差很多,而且变化速率相对较缓,这也更加说明了双侧壁导坑法的优越性。

可见,采用双侧壁导坑法开挖可以大大减小开挖引起的拱顶下沉量和地表沉降量,一定量的减小底部隆起量;采用短台阶段虽然可以大大减小底部隆起量,但开挖引起的下沉量却增大很多。

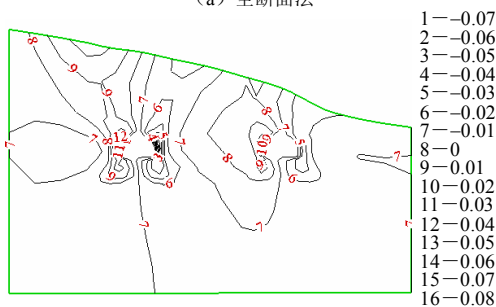
4.1.2 围岩水平位移

4种工法水平方向位移云图如图8所示。开挖过程中,隧洞周边围岩均产生向洞内(悬空面)收敛的位移,致使洞室断面变小。采用单侧壁导坑工

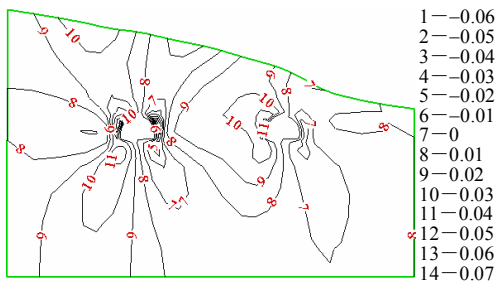
法时围岩发生的位移量及其范围明显大于其他工法。



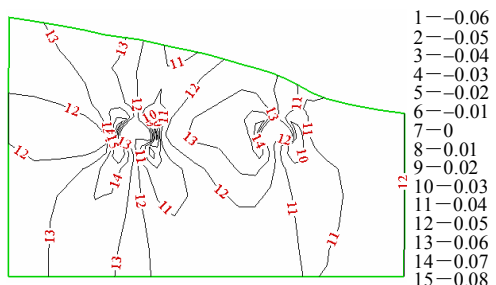
(a) 全断面法



(b) 短台阶法



(c) 单侧壁导坑法



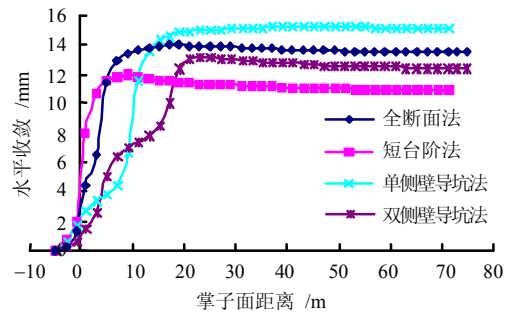
(d) 双侧壁导坑法

图8 水平位移云图 (单位: m)

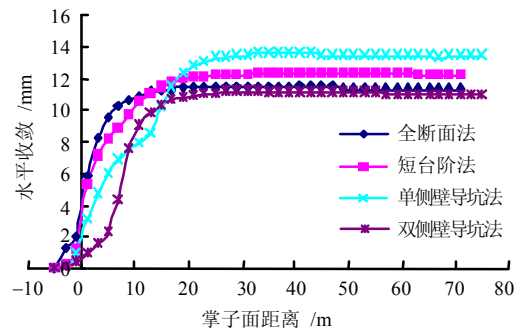
Fig.8 Contour of horizontal displacement(unit: m)

将模拟计算所得的左线 $Y=5\text{ m}$ 和右线 $Y=5\text{ m}$ 断面处隧洞两侧拱腰及边墙特征点的相对水平位移绘成曲线, 即拱腰水平收敛与边墙水平收敛曲线, 进行直观地比较, 如图9、图10所示。

(1) 对于左线隧洞, 采用双侧壁导坑法时, 得到的水平收敛明显小于其他工法所得值, 且稳定较快; 全断面法也产生较小的水平收敛值, 但水平收敛达到最大值的时间最短, 这就要求施工时支护必



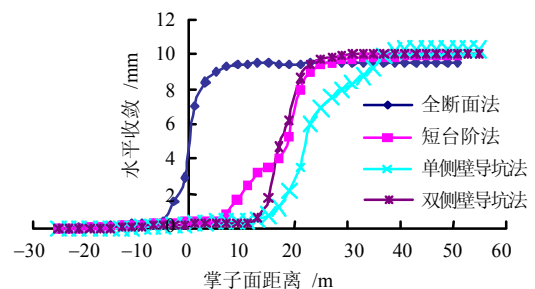
(a) 边墙水平收敛曲线



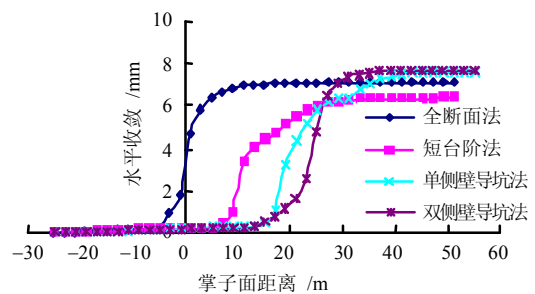
(b) 拱腰水平收敛曲线

图9 左线 $Y=5\text{ m}$ 断面水平收敛曲线

Fig.9 Horizontal convergence curves of left of $Y=5\text{ m}$



(a) 边墙水平收敛曲线



(b) 拱腰水平收敛曲线

图10 右线 $Y=5\text{ m}$ 断面水平收敛曲线

Fig.10 Horizontal convergence curves of right of $Y=5\text{ m}$

须及时到位, 增加了支护的难度和不安全。采用短台阶法时, 得到边墙水平收敛明显大于其他工法, 其上台阶开挖产生的水平位移远小于下台阶, 因此, 下台阶开挖时, 必须注意边墙的支护。采用单侧壁导坑法时, 得到的拱腰水平收敛明显大于其他工法, 左右幅引起的位移量相当。然而, 对于右线隧洞, 各种工法引起的水平位移量基本相同, 而且

双侧壁导坑法产生的位移还略大于其他工法（详见表3），可见左线的开挖对右线有一定的影响。

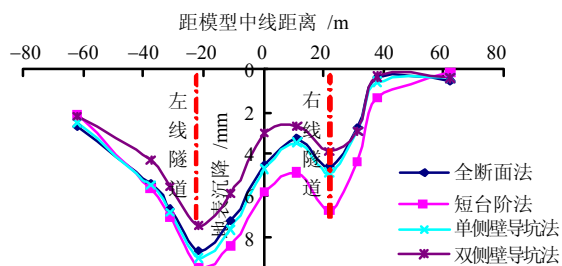
表3 最大水平位移 /mm
Table 3 Maximum of horizontal displacement

施工方法	边墙水平收敛		拱腰水平收敛	
	左洞室 $Y=5\text{ m}$	右洞室 $Y=5\text{ m}$	左洞室 $Y=5\text{ m}$	右洞室 $Y=5\text{ m}$
全断面法	11.91	9.52	11.45	7.12
短台阶法	15.19	9.93	12.31	6.39
单侧壁导坑法	13.10	10.28	13.56	7.57
双侧壁导坑法	13.98	10.07	11.19	7.67

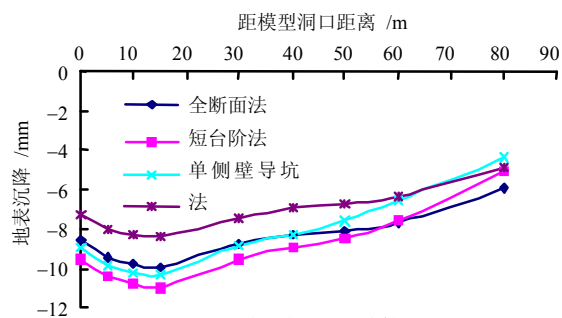
（2）除全断面法外，其余工法均采用了分步开挖方式，但从图中各曲线可以看到，双侧壁导坑法得到的位移曲线其台阶特性要较其他两种工法差很多，而且变化速率相对较缓。

4.1.3 地表沉降

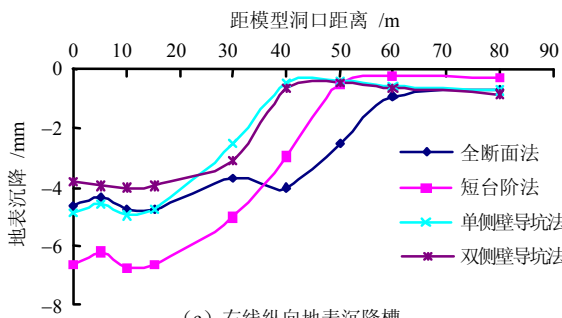
在模拟计算中，对模型左线 $Y=2\text{ m}$ 断面横向布置了11个监测点，左右线隧洞中线沿纵向各布置了9个监测点。将计算结果绘成横向沉降槽曲线、左右线纵向沉降槽曲线如图11所示。由图可知：



(a) 横向地表沉降槽



(b) 左线纵向地表沉降槽



(c) 右线纵向地表沉降槽

图11 地表沉降槽曲线

Fig.11 Subsidence curves of ground surface

（1）横向地表沉降槽曲线中，双侧壁导坑法沉降量最小，而短台阶法沉降量最大，且随着据开挖面距离的增大而减小速率也较其他工法要大。

（2）左右线纵向沉降槽曲线中，对于左线，各工法引起的沉降量随着掌子面距离的增加而减小的速率基本一致，而右线各工法沉降变化速率则波动相对较大，这说明超前开挖的左线对右线有着较大的影响。

4.2 隧洞围岩塑性区分析

由数值模拟计算，采用4种施工方法时隧道围岩形成的塑性区如图12所示。

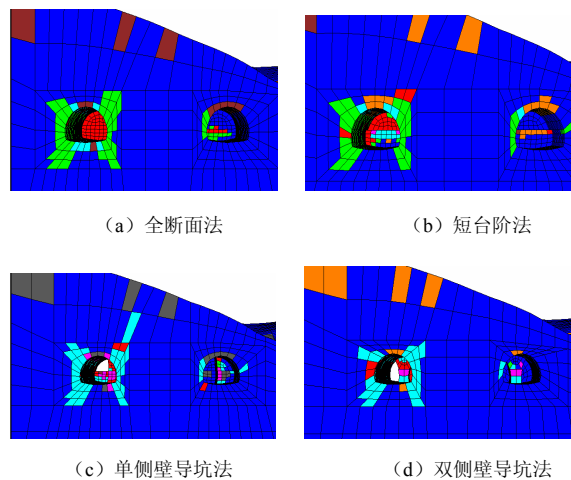


图12 塑性区分布图

Fig.12 Plastic zone layout

（1）隧道开挖后，在隧道拱腰的岩层中均出现塑性区。在边墙底部的围岩，因开挖边界几何形状引起的应力集中而出现范围较小但应变值很大的塑性区。隧道围岩塑性区主要分布在隧道拱腰、边墙及底部两侧范围的岩层内^[6]。

（2）采用全断面开挖时，在隧洞周围形成闭合的塑性区，虽然塑性区半径较出双侧壁导坑法外的其余工法均略小，但是由于隧洞底部产生了塑性区，故仰拱施作必须及时可靠。而采用短台阶法开挖时，隧洞底部塑性区最小，但是顶部塑性区最大，为受拉屈服区，且与两侧拱腰塑性区形成连通区域，造成该区域围岩首先破坏，进而使洞体失稳。

（3）从图中很明显的看到，双侧壁导坑法产生的塑性区范围比其他工法要小很多，其体积明显小于其他工法（详见表4），对隧道安全施工较为有利。

表4 塑性区体积（单位： 10^3 m^3 ）

Table 4 The volume of plastic zone(unit: 10^3 m^3)

施工方法	全断面法	短台阶法	单侧壁导坑法	双侧壁导坑法
塑性区体积	40.99	36.21	39.02	34.79

5 结 论

通过对广福隧道浅埋段拟采用的几种工法的数值计算与对比,得出如下一些结论:

(1) 就隧道开挖引起的竖向位移和水平收敛而言,采用双侧壁导坑法开挖时引起的竖向位移和水平收敛要较采用其他工法小,且位移曲线台阶性不明显,位移稳定也很快,支护时便于控制。

(2) 从隧道围岩塑性区的分布范围分析,隧洞开挖时均在左右两侧拱腰岩层中出现塑性区。但采用短台阶法开挖时,拱顶出现受拉屈服区半径较大,并与两侧塑性区相连通,造成洞体整体失稳,采用双侧壁导坑法塑性区半径最小,安全可靠度最高。

参 考 文 献

[1] 蒋树屏,刘洪洲,鲜学福. 大跨度扁担隧道动态施工的

相似模拟与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 20 (5): 186—190.

[2] 刘波,韩彦辉(美国)编著. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. 354—360.

[3] JTGD70-2004, 公路隧道设计规范[S].

[4] 霍卫华. 软岩大跨隧道施工力学研究[J]. 河北理工学院学报, 2004, (4): 263—266.

[5] 朱汉华,尚岳全. 公路隧道设计与施工新法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. 198—204.

[6] 马万权. 阳宗隧道试验段动态开挖过程的数值模拟[J]. 地下空间, 2003, 23 (3): 256—259.