

大断面隧道中三台阶五步法的数值模拟分析与监控量测研究

杨志强

(北京建工集团有限公司, 北京市 100000)

摘要: 针对南垭路三号隧道施工过程中遇到的工期紧张、围岩软弱等难点, 该文使用FLAC^{3D}有限差分软件模拟了三台阶五步法的施工过程, 初步验证了其在软弱围岩中开挖大断面隧道的可行性, 对原施工方案进行了更改。后期现场监测数据证明: 使用三台阶五步法进行施工后, 隧道具有较好的稳定性, 改进后的施工方案将工期整整提前了8个月, 满足了工期要求, 节省了大量的人力物力, 创造了可观的经济效益。

关键词: 三台阶五步法; 隧道稳定性; 数值模拟; 现场监测

目前国内外超大断面隧道较安全的施工方案是双侧壁导坑法、CD法、三台阶七步法等。CD法适用于掌子面不太稳定, 埋深较浅及围岩较差时, 可适用于Ⅳ级围岩浅埋的大跨隧道, 工法安全性高; 三台阶七步法适用于特大断面隧道Ⅴ级围岩深埋、浅埋和Ⅳ级围岩浅埋、偏压地段的正洞开挖施工, 其施工技术难度较低, 施工工序简单, 工期较快, 而且造价相对较低; 双侧壁导坑法主要适用于地层较差、断面很大、其他工法无法满足的多线特大断面铁路隧道及地铁工程, 是大跨度隧道在软弱围岩段施工的主要工法。在围岩软弱段的大断面隧道施工中使用这些工法固然安全, 但由于工法较为保守, 将不可避免地带来施工方法繁琐、机械化程度低、劳动强度大、对围岩扰动大、工期滞后、经济效益低等问题。该文结合贵阳南垭路隧道, 验证使用三台阶五步法在软弱围岩中开挖大断面隧道的可行性。

1 工程概况

贵阳市南垭路三号隧道为分离式双向八车道隧道, 全长1 171.1 m, 隧道开挖宽度21.8 m, 高度14.3 m, 其左右两隧道净距21.8 m, 隧道开挖断面大。隧道处于喀斯特地貌地区, 地下岩溶较发育, 围岩属Ⅳ、Ⅴ级, 岩体破碎, 节理发育, 其强度与稳定性均较差。南垭路隧道工期要求于2016年5月之前完工, 但由于隧道北端附近坟墓密集, 征地拆迁滞后, 施工时进口不具备施工条件, 所以隧道仅能从出洞口一端进行施工, 使

施工工期大大延长。为优先保证隧道能够顺利安全地开挖, 该隧道原设计全段采用双侧壁导坑法进行施工, 但该工法施工速度较慢, 无法满足工期要求, 需对施工方案进行优化。

2 三台阶五步法施工

台阶法施工是先开挖上半断面, 待开挖至一定长度后同时开挖下半断面, 上、下半断面同时并进的施工方法。近年来, 在大断面隧道中使用的台阶法包括: 三台阶七步法、三台阶预留核心土法、三台阶临时仰拱法, 多台阶法等。三台阶五步法与上述工法相比: 未留核心土, 从而减少了施工工序, 节省工期, 同时减少各部开挖的扰动影响; 每一台阶净空较大, 便于人员和大型机械作业, 可以多作业面同时施工, 地质条件变化时, 可灵活、及时地转换施工工序, 调整施工方法; 其初期支护工序操作简单, 平行施做初期支护, 各部分初期支护衔接紧密, 采用合理的台阶长度, 可确保初期支护尽早成环。在保证隧道稳定性的前提下, 在隧道Ⅳ级围岩段改用三台阶五步法施工可以大大加快施工进度。三台阶五步法的施工工序如图1所示。

(1) 上台阶①开挖, 爆破开挖完成后及时施作上台阶初支⑨, 并监控掌子面变形。

(2) 当支护⑨达到一定强度时, 左侧中台阶②开挖, 及时施作初支⑩, 并监控掌子面变形。

(3) 当支护⑩达到一定强度时, 右侧中台阶③开

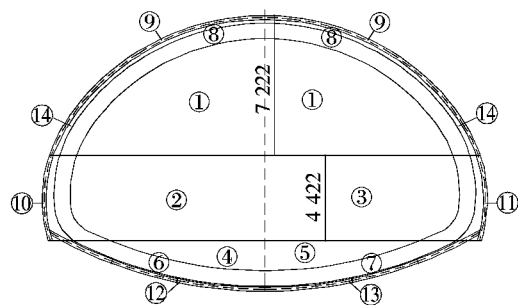


图 1 三台阶五步法开挖步序图(单位:mm)

挖,及时施做初支⑪,并监控掌子面变形。

(4) 当支护⑪达到一定强度时,左侧仰拱④开挖,及时施做初支⑫,并监控掌子面变形。

(5) 当支护⑫达到一定强度时,右侧仰拱⑤开挖,及时施做初支⑬,并监控掌子面变形。

(6) 待初期支护闭合并达到一定强度时,浇筑左侧仰拱⑥。

(7) 仰拱⑥达到一定强度时,浇筑右侧仰拱⑦。

(8) 浇筑二次衬砌⑧,使二次衬砌闭合,为充分发挥围岩自承能力,容许初期支护与围岩有一定的变形,结合实际埋置深度、施工方法和支护情况,初支与二衬间预留 120 mm 变形量⑭,防止二衬发生侵限情况。

在Ⅳ级围岩段将原设计方案改为三台阶五步法后,势必可以大大加快施工进度,但是其安全性及隧道稳定性尚待考量。

3 施工过程模拟

相对于原设计方案的双侧壁导坑法,三台阶五步法无疑是较为“冒进的”,由于围岩软弱破碎、隧道跨度较大,其可能无法胜任Ⅳ级围岩段的施工要求。为验证三台阶五步法在Ⅳ级围岩段施工的可行性,采用 FLAC^{3D}有限差分软件进行隧道开挖的模拟,分别从洞周位移、围岩压力、初期支护应力及塑性区等方面来分

析隧道的稳定性。

3.1 模型建立及计算过程

计算中选取一段典型里程进行模拟。根据工程实际情况,隧道断面净高 14.321 m,最大跨度 21.878 m。隧道仰拱距模型底部约 3 倍跨度(42 m),模型左右两边宽度各取 4 倍跨度,沿隧道掘进方向取 80 m,计算模型中隧道的沿线埋深按地勘资料取值,范围为 7~19.5 m,模型尺寸为 $X \times Y = 243 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ 。模型除顶部外,各边界均约束其法向位移。隧道模型如图 2 所示。

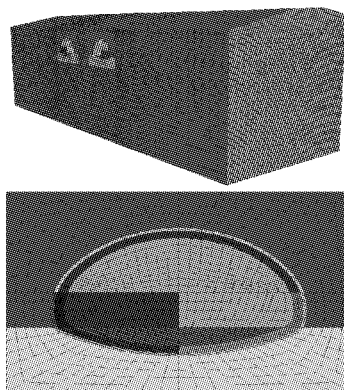


图 2 三台阶五步法开挖隧道模型

现场选取部分岩块进行物理力学参数试验,得到围岩的物理力学参数如表 1 所示。初期支护中的喷射混凝土物理力学参数参考 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》取值。

隧道施工的开挖模拟过程为:① 对掌子面拱顶 180°范围内进行注浆预加固;② 台阶进尺滞后,及时架立钢支撑并喷射混凝土,进行初期支护;③ 保证各掌子面(导坑)纵向相距的长度,各掌子面(导坑)同时掘进;④ 右洞开挖至一定距离时,开始左洞开挖,右洞和左洞开挖方法一致,直至最后双洞均开挖并支护完毕。开挖循环进尺为 1 m。

此次数值计算,循环进尺为 1 m,即循环开挖过程

表 1 计算参数取值

材料	弹性模量/ ($\times 10^4 \text{ MPa}$)	泊松比	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
Ⅳ级围岩	0.24	0.33	2 250	0.40	30
初期支护	2.55	0.23	2 500	—	—
临时支护	1.7	0.23	2 500	—	—
加固圈	0.24	0.33	2 300	0.48	36

中,每一计算步各掌子面掘进 1 m。每一计算步中,考虑应力释放,即开挖后进行 100 步迭代计算,再施做初

支及临时支撑。每一步支护施做完毕后,计算到收敛为止。

3.2 计算结果分析

(1) 洞周位移

分别对隧道 40 m 断面处拱顶、拱腰及仰拱处的位移进行监测,其位移随开挖步数的变化曲线如图 3~5 所示。

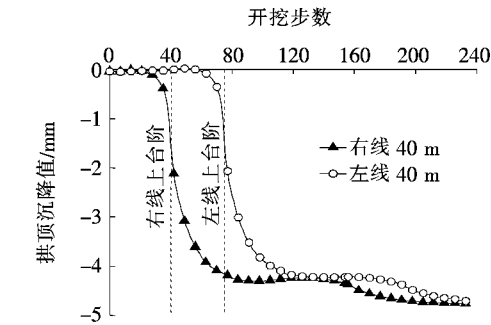


图 3 三台阶五步法模拟拱顶沉降曲线图

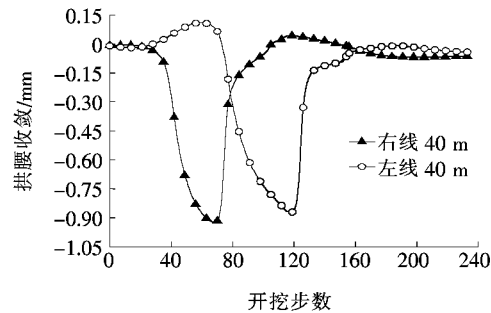


图 4 三台阶五步法模拟拱腰收敛曲线图

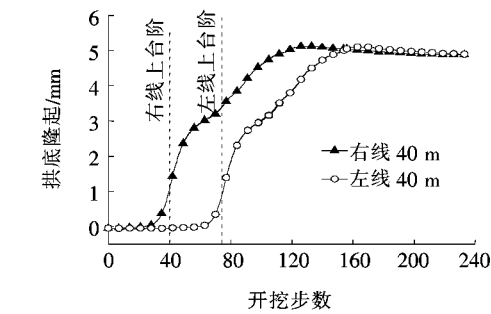


图 5 三台阶五步法模拟拱底隆起曲线图

从图 3 可看出:由于右线先于左线开挖,因此,左线变形具有一定的滞后,但最终趋于稳定后的沉降值差别不大。同时,隧道开挖至考察断面前,施工对拱顶考察点的影响较小,沉降值几乎为零;开挖至考察断面附近上台阶时对拱顶沉降的影响最大,其沉降值急剧增大。当一个断面完整的循环开挖通过后,沉降值趋于稳定。

由图 4 可知:40 m 断面之前的开挖步拱腰收敛变化速率变化较慢。同样在施工至考察点附近时拱腰收敛变化速率有较大突变,但是最大收敛值仍较小,开挖

过程几乎对拱腰收敛无影响。

由图 5 可知:拱底隆起变化规律与拱顶沉降相似,掌子面离考察断面较远时,拱底位移值缓慢变化;施工至考察断面时,位移变化速率有所突变,当一个完整的循环通过考察断面时,拱底隆起值趋于稳定。

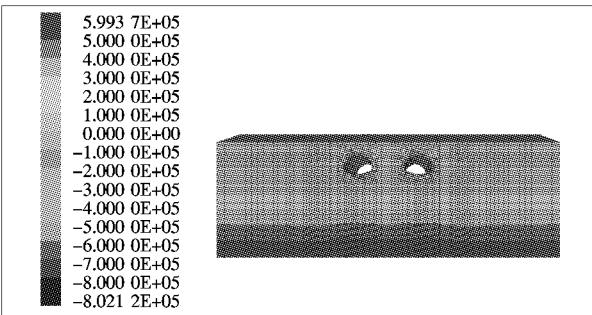
经过统计得到洞周 40 m 断面处位移稳定值如表 2 所示。

表 2 三台阶五步法施工考察点位移 mm			
位置	拱顶沉降	拱腰水平收敛	拱底隆起
右洞	4.76	0.92	5.12
左洞	4.71	0.87	5.10

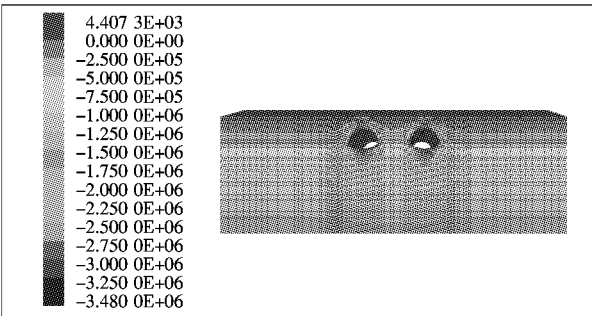
由以上数值模拟计算可看出,各监测点的位移最大变化值为 5.12 mm,变形值在 JTG F60—2009《公路隧道施工技术规范》允许的范围内。

(2) 围岩压力分析

分别对拱顶、拱腰及仰拱处的最大、最小主应力进行监测,隧道贯通后取 40 m 断面分析其洞周应力,计算云图见图 6。



(a) 最大主应力



(b) 最小主应力

图 6 三台阶五步法模拟主应力云图(单位:Pa)

从图 6 可看出:开挖后应力主要集中在隧道的拱顶、拱腰、边墙和拱底,且在拱底附近一定范围内出现拉应力区域,同时,隧道拱顶和拱底的应力变化较大。考察点的最大主应力、最小主应力如表 3 所示。

表 3 三台阶五步法施工围岩压力 MPa

位置	右洞		左洞	
	最小主应力	最大主应力	最小主应力	最大主应力
拱顶	-1.239 8	0.162 9	-1.129 6	0.180 4
拱腰	-2.666 9	-0.155 7	-2.457 8	-0.125 9
拱底	-1.708 8	-0.465 1	-1.690 2	-0.459 9

由表 3 可看出:围岩总体受压,且远小于围岩的单轴抗压强度。

(3) 初期支护内力分析

隧道贯通后取 40 m 左线断面分析其初支各点的受力情况,其弯矩和轴力如图 7 所示。

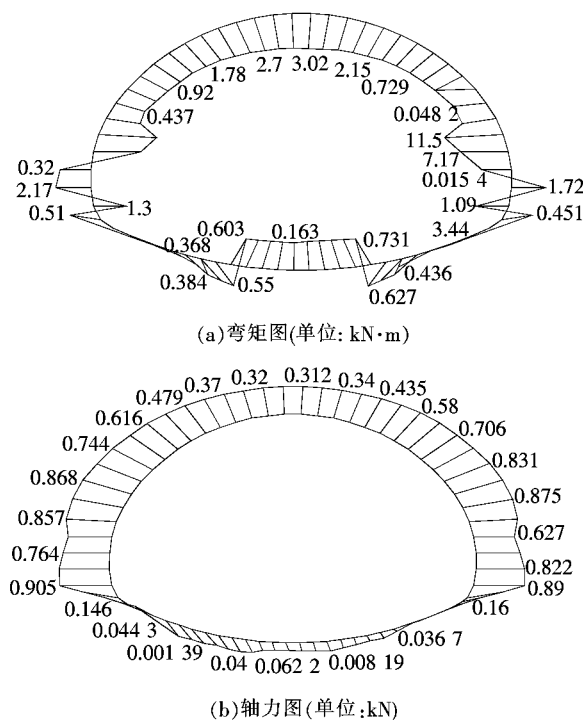


图 7 隧道左线初支内力图

由图 7(a)可知:拱顶、拱腰、仰拱和拱底等关键点的弯矩较大,其原因可能是隧道在该处的曲率发生变化,易产生应力集中现象。从图 7(b)可看出:拱腰位置因为隧道断面扁平,其轴力明显大于其他部位。初支的弯矩及轴力均在强度范围内。

(4) 塑性区分布

隧道塑性区分布情况如图 8 所示。

由图 8 可看出:围岩塑性区仅少量分布在隧道周围,不会对隧道稳定性造成较大影响。

以上数值计算结果分析表明:在南垭路三号隧道 IV 级围岩段改用三台阶五步法施工是合理的,隧道开挖支护后,具有较好的稳定性。

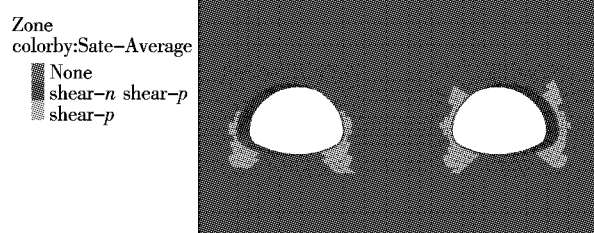


图 8 塑性区分布图

4 监测数据验证

基于前文分析计算,将 IV 级围岩段改为三台阶五步法施工,并及时对隧道进行位移、应力等的监测工作。

以 IV 级围岩段 LK3+224 断面为例,对监测结果进行分析。

4.1 围岩内部位移(图 9)

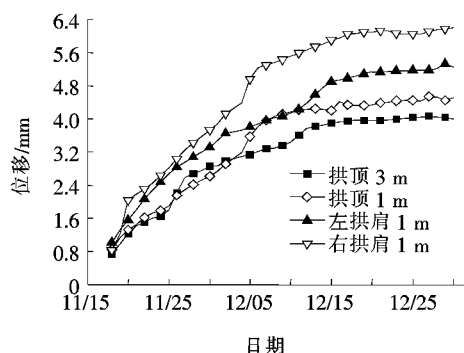


图 9 位移时程曲线图

由图 9 可知:LK3+224 断面不同位置的围岩位移初始值均在 1.25 mm 左右,在最初的 10 d 时间内,位移变化较快,15 d 后位移增长较慢,曲线基本趋于稳定。位移最大值发生在右拱肩 1 m 处,其值为 6.28 mm,则围岩最大位移变化值约为 5.03 mm。

4.2 围岩压力(图 10)

由图 10 可知:LK3+224 断面围岩压力较小,由于左仰拱的开挖施作,右拱肩测点压力值在 35 d 后出现较大突变,达到了 0.082 MPa。检测结果表明围岩虽然破碎,但岩体强度仍然较高,具有较好的自承能力。

4.3 喷射混凝土应力(图 11)

由图 11 可知:各断面喷射混凝土的应力均较小,监测初期,喷射混凝土应力以一定的变化率变化,后达到稳定状态;由于两线隧道间相互影响,左线右侧拱腰和仰拱位置应力变化较大,且其应力值较其他监测部位也较大。LK3+224 断面最大压应力发生在右仰拱下方测点,约为 13.081 MPa,小于喷射混凝土的极限

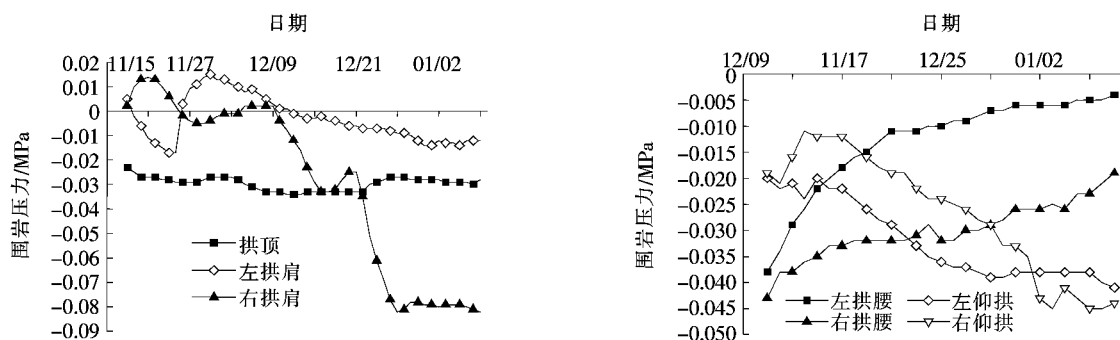


图10 围岩压力时程曲线

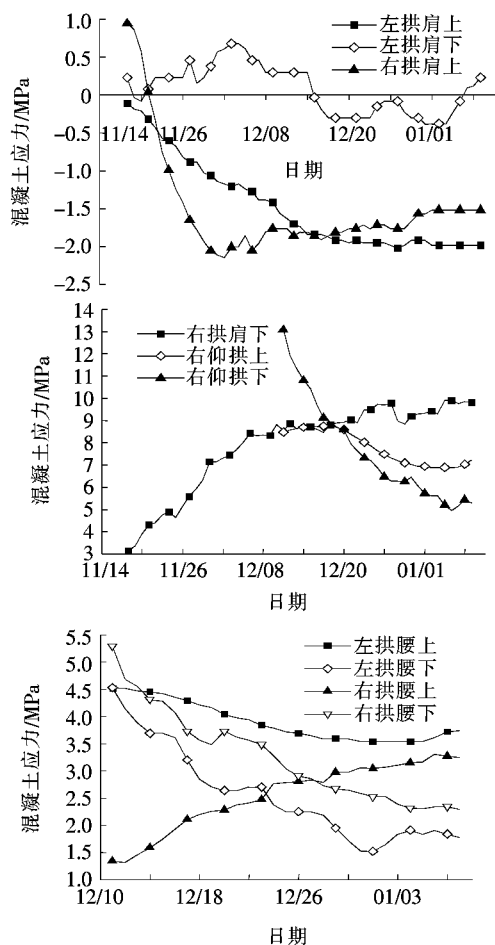


图11 喷射混凝土应力时程图

承载能力。由此可知:初支结构处于安全状态,隧道围岩一支护体系稳定。

5 结论

(1) 为了加快南垭路三号隧道的施工进度,引入了三台阶五步法的施工方案,通过数值模拟的方法,初步证明了三台阶五步法在南垭路三号隧道Ⅳ级围岩段施工的可行性。

(2) 对施工过程进行实时监测表明:使用三台阶五步法施工后,各监测数据均在允许范围内,隧道稳定性有较好的保证,从而验证了该工法在Ⅳ级围岩段的可行性。

(3) 使用三台阶五步法施工后,加快了施工进度,大大提前了工期,将完工时间从最初全隧道双侧壁施工方案的2016年11月中旬完工提前到2016年2月,整整节省了8个多月。

参考文献:

- [1] 章慧健.大跨大断面隧道的施工力学行为及优化研究[D].西南交通大学博士学位论文,2010.
- [2] 马乙一.隧道穿越断层破碎带施工过程围岩位移特征研究[J].中外公路,2017(3).
- [3] 谢春华.无中导洞城市连拱隧道施工工法分析研究[J].中外公路,2017(4).
- [4] Jeon S, Kim J, Seo Y, et al. Effect of a Fault and Weak Plane on the Stability of a Tunnel in Rock — A Scaled Model Test and Numerical Analysis [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41 (3): 658—663.
- [5] 王康.超大断面小净距隧道施工围岩空间变形与荷载释放机制及工程应用[D].山东大学博士学位论文,2017.
- [6] 邓祥辉,袁崇洋,姚军,等.某超浅埋大跨隧道下穿既有公路施工工法研究[J].中外公路,2018(4).
- [7] Gao J. R., Luo J. C., Tu W. X.. Researches on the Key Technology and Equipment for Rapid Construction of Long Tunnels with Large Section [J]. Engineering Sciences, 2010, 8(1): 40—43.
- [8] 汪洋,王晓睿,唐雄俊,等.高地应力条件下软岩隧道大变形数值模拟[J].中外公路,2009(5).
- [9] 吴正恺.大断面市政公路隧道扁平率与支护参数适宜性研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2017.
- [10] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].
- [11] 曲海锋.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.