大跨度变截面隧道施工工法数值模拟分析

孙引浩

(中铁二十局集团 第一工程有限公司,江苏 苏州 215151)

摘要:针对后岭下隧道内引出联络线段设计跨度大、变截面横向扩挖尺寸长、安全风险高等 特点,对三台阶临时仰拱法上台阶采用支立门架法和类正洞台阶法横向过渡扩挖的2种方案进 行了数值模拟,即在10m过渡段内上台阶分部开挖:纵向先、后行导坑开挖并架设竖向支撑,支 点上部纵向加设连接梁或用槽钢将环向拱架纵连。然后拆除扩挖侧中间竖撑,形成横向扩挖门 洞,扩挖施工中采取支立门架法防护或类正洞台阶法扩挖,并最终扩挖至拱脚,最后接长正洞环 向拱架,完成过渡段上台阶施工。数值模拟分析结果表明,2种方法均安全可行,结合现场围岩 实际情况,本工程采取了支立门架方案成功完成了扩挖,洞周土体变形的监测值和模拟值变化 规律基本一致,土体位移与应力变化均小于模拟值,且在允许范围内。本案的成功实施为类似 大跨度变截面隧道横向扩挖施工提供重要的参考和借鉴,具有重要的实用意义。

关键词:大跨度隧道;变截面;横向扩挖;围岩稳定性分析

中图分类号: U25 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373(2023)01 - 0077 - 07

0 引言

近年来,国内高速铁路、高速公路建设发展迅猛,其中隧道建设的总里程不断延伸,由于功能的需求, 部分段落断面设计尺寸不断突破传统极限,因此,开展对大跨度变截面施工技术安全性研究显得尤为重 要。大断面隧道开挖时围岩应力的改变与荷载的释放过程较为剧烈,尤其对横向扩挖加大的变截面段落 隧道施工,为了减少对周围土体的扰动,保证施工的安全性,选择有效的开挖与支护方法就显得极为 重要^[1-2]。

国内外学者从多方面对大跨变截面隧道进行了大量的研究工作。任东平^[3]针对3种宽度大断面过 渡的问题,重点分析了台阶法+临时横撑向三台阶临时仰拱法过渡段、三台阶临时仰拱法向双侧壁导坑 法过渡的施工方法,并给出了具体施工步骤。杨迪等^[4]针对双侧壁导坑法转换至台阶法施工过程中的工 法转换难题,提出了具体的工法步骤,并采用有限元方法验证了工法转换的可行性。洪军等^[5]提出"靴型 大边墙+加劲拱"的开挖工法,应用于超大跨度隧道中的三线变截面段,分析得出在隧道扩挖段墙角处形 成的靴型边墙,通过优化其支护结构可防止隧道上部结构失稳。闫明超等^[6]依托沪昆客专壁板坡隧道, 分析研究了依次扩大的4个变截面工况的施工过程,对超大断面隧道变截面施工技术的要点进行了总 结。随着计算机技术的发展,部分学者将FLAC 3D^[7]、Midas GTS/NX^[8]、ANSYS^[9-10]、ABAQUS^[11]等各 类数值分析软件应用到变截面隧道施工及支护结构的分析中,在很大程度上为理论研究及工程应用提供 了技术支撑。在隧道断面大小发生突变时,变截面断面处对支护方式和支护时机等方面均有特殊的要 求,需要采取多种措施。廖雄^[12]在对大跨变截面隧道的围岩变形规律和变形控制措施的研究中,对3个 不同变截面进行了围岩变形规律的对比,得出通过缩短台阶长度、施作超前支护结构等措施可控制围岩 的变形。梁中勇等^[13]依托实际隧道工程,通过对现场的监测数据进行分析,发现变截面软岩隧道施工过 程中右侧导坑受力基本大于左侧导坑,并对变截面处的堵头墙提出了相应的支护措施。

收稿日期:2022-10-18 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220315 基金项目:陕西省自然科学基础研究计划青年项目(2022JQ-563) 作者简介:孙引浩(1980—),男,高级工程师,研究方向为隧道施工。E-mail:530913805@qq.com 孙引浩.大跨度变截面隧道施工工法数值模拟分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):77-83. 依托南龙铁路后岭下隧道工程在大跨度横向变截面施工段落,拟定在三台阶临时仰拱上台阶采用横 向支立门架或类正洞台阶法完成变截面横向扩挖的过渡方案,并通过建立有限元数值模型,对2种不同 施工方案下变截面段落扩挖施工关键节点应力、位移变化以及力学效应进行研究分析,在理论可行的情 况下,控制关键工序,科学组织施工,最大限度保证了过渡段的施工安全,为类似大跨度变截面隧道的横 向扩挖工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

后岭下隧道处于戴云山脉西北部,沿线主要山脊线和河流多呈北东一南西方向。沿线地形起伏较 大,山势陡峻,冲沟和溪流发育,相对高差100~900 m。剥蚀低丘地形平缓,相对高差50~200 m,植被发

育;丘间谷地和河流阶地发育,较为宽阔,城镇村庄密集,局 部辟为良田。隧道 DK43+108~DK43+179 段,最大开挖跨 度分别为 15.12、20.51 m。隧道变截面点位于 DK43+150 处,开挖断面由宽 15.12 m×高 13.61 过渡到宽 20.51 m× 高14.22 m。设计在 DK43+108~DK43+150 段采用台阶 法施工,DK43+150~DK43+179 大跨度段采用双侧壁导坑 法施工,见图 1。

该处单侧横向直拐扩挖达 5.39 m,直拐作业面空间受限,且 2 种工法转换困难,工序复杂,极易发生安全事故,因此对变截面处围岩力学效应进行分析,采用合理的开挖、支护方法过渡十分必要。



图 1 后岭下隧道大跨段断面(单位:m)

2 总体施工方案

针对后岭下隧道大跨度过渡段变截面的设计特点,提出在台阶法和双侧壁导坑法硬性变化处采用上 三台阶临时仰拱法过渡,并在过渡段上台阶内采用支立门架法或类正洞台阶法完成横向扩挖的总体方 案,着重对横向扩挖方案进行分析阐述。如图2所示,过渡段上台阶总长10m,纵向分为3个小导坑,先 纵向开挖①导坑10m,再开挖②-1、②-2导坑约6m,其中②-2为右侧拱部拱部扩挖部分,为保证安全,① 导坑掌子面需超前②导坑掌子面3~4m;③导坑开挖前拆除右侧竖撑中间部分,纵向两端竖撑与拱部纵 向连接梁或槽钢形成③导坑的开挖门洞,门洞纵向长5~6m,在门洞下边横向开挖③导坑至正洞环向拱 脚。③导坑采用支立门架法(方案Ⅰ)或类正洞台阶法(方案Ⅱ)。



图 2 施工段平面示意图(单位:m)

2.1 方案 [支立门架法

围岩较差情况下,③导坑开挖采用支立门架法,较为安全。每循环进尺 0.6~1 m(根据围岩稳定情况可 调整),考虑到 B 轮开挖廓线外需要架设门架,故其开挖轮廓线比 B 断面设计轮廓半径大至少 35 cm。开挖后 及时紧贴拱部、正洞掌子面侧、直立端面侧的围岩架立I18 门架;A、B 断面交界的直立端面拱脚处,对应每 榀门架竖撑打设 2 根 Φ42 mm 长 4 m 锁脚锚管,然后挂网、打设锚杆、喷射混凝土。喷混后要保证所有门 架横梁底部支护面标高不影响 B 断面环向拱架架立。 ③导坑开挖至 B 断面边墙拱脚位置后,一次性接长 B 断 面的环向初支拱架,并对应每榀拱架打设 2 根 Φ42 mm 长 4 m 锁脚钢管,按设计锚喷混凝土至设计厚度。

完成③导坑扩挖支护后,②、③导坑顺着正洞纵向开 挖至与导坑①掌子面齐平(见图 3),至此,完成过渡段上 台阶施工,为大跨度断面施工提供作业空间。

2.2 方案 II 类正洞台阶法

围岩较好情况下采用类正洞台阶法,可简化工序,提 高工效。即③导坑开挖,边墙纵向预留台阶,环向接长型 钢拱架,拱架左侧与拱部正洞拱架连接,右侧拱脚支立在 坚硬的台阶基底上,并对应每榀拱架端头部位打设2根 Φ42 mm 长4 m 锁脚锚管,然后挂网、锚喷混至设计厚 度,达到一定强度后继续开挖④至拱脚。

完成③导坑扩挖支护后,②、③导坑顺着正洞纵向 开挖至与导坑①掌子面齐平(见图 4),至此,三台阶临时 仰拱上台阶完成过渡施工,为大跨度断面施工提供作业 空间。

3 数值模拟分析

3.1 计算模型

采用 Midas GTS/NX 岩土有限元软件建立三维隧道 模型。模型上表面距离地面 66.5 m,根据圣维南原理并结 合现场实际情况,在横向取 71 m,纵向取 100 m,隧道中心 距离模型底部为 25 m,模型左右的边界约束为水平方向, 底边为全约束。计算时假定隧道围岩为连续、均匀、各向 同性的弹塑性实体单元,初期支护采用壳体单元模拟,临 时竖向支撑采用梁单元模拟,锚杆采用植入式梁单元模 拟,如图 5 所示。计算中土体采用摩尔-库伦弹塑性模 型,衬砌和锚杆均采用弹性模型。模型共划分107 777个 节点和 47 754 个单元。模型材料属性参数见表 1。



图 3 支立门架法(单位:m)



图 4 类正洞台阶法(单位:m)



图 5 有限元模型

- 衣 Ⅰ 保空的 件 禺 住 爹 爹	表 1	模型	材料	属性	参数
---------------------	-----	----	----	----	----

材料	重度/(kN•m ⁻³)	弹性模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	泊松比
Ⅳ级围岩	23	6	35	0.6	0.33
C25 喷射混凝土	23	23			0.20
I20b 型钢	78	200			0.25
锚杆	78	200			0.25
C35 二衬	23	32		—	0.20

3.2 施工步骤模拟

①模拟实际地应力场,进行初始状态位移清零;②小断面隧道进行台阶法开挖与支护,施作锚杆;③ 过渡段采用三台阶临时仰拱法施工,上台阶开挖高度控制在 4~5 m,右侧扩挖部分时模拟用类正洞台阶 法和支立门架法;④过渡段进行支护;⑤大跨断面采用双侧壁导坑法施工。

第36卷

数值模拟分析 4

4.1 变截面处竖向位移

为观察变截面处位移变化情况,选取 DK43+ 150.2 处变截面关键节点,针对整体施工过程的竖 向位移进行分析(见图 6)。随着隧道施工的进行, 变截面各处竖向位移基本呈增长趋势,其中拱顶和 仰拱底部增幅最大,其次是左右拱腰,左右拱脚增幅 最小。

4.2 方案 Ⅰ、Ⅱ 洞周土体变形分析

过渡段上右部分开挖支护完成之后,方案[所引 起的洞周竖向位移最大值为 14.13 mm,方案[所引起 的洞周竖向位移最大值为17.19 mm(见图7)。方案[引起的拱顶、拱腰、拱脚沉降分别为 1.34、6.33、2.04 mm;方案[[分别为5.01、7.19、4.19 mm,方案]引起的 沉降均小于方案Ⅱ,并且发展平缓,说明方案Ⅰ对洞周 土体的变形控制效果优于方案Ⅱ。

4.3 方案 [、]] 洞周土体应力分析

图 8 为 2 种方案下过渡段上右部分施工过程 中,y=14 m处洞周土体的应力云图。对比2种工法 应力的分布可以看出:方案 [开挖支护完成后,上部 临空面应力分布均匀且应力值较小,但分布不均匀。 开挖掌子面出现2处应力集中现象且应力值较大, 最大值为 0.77 MPa,最小值为 0.028 MPa。方案 []







图 7 2 种施工方案竖向位移

开挖支护完成后,整体应力分布趋势与方案 [相似。开挖结果证明,2种方案的施工工法与支护结构对洞 周土体应力的控制效果较好,其中方案Ⅰ比方案Ⅱ更好地解决了应力集中现象,施工更加稳定。







4.4 方案 [、]] 衬砌应力分析

方案 I 过渡段开挖完成后最大主应力最大值分布在拱脚与土体连接处,约为 21.53 MPa(见图 9 (a)),由于土体对衬砌的挤压,造成此处应力集中明显;最大主应力最小值位于大断面开挖上下台阶交界 处,约为2.41 MPa,说明土体连接处和交界处承受较大主应力。方案 II 最大主应力最大值与方案 I 位置 相同,约为29.36 MPa,最大主应力最小值位于上台阶衬砌处,约为8.41 MPa(见图9(b)),过渡段开挖 完成后衬砌上部出现大面积分布不均拉应力。由此得出使用方案 [施工可以使衬砌应力分布均匀,并且





图 9 2 种工法下过渡段上右部分衬砌最大主应力

4.5 方案 [、]] 塑性区分析

图 10 为变截面施工结束后,2 种方案塑性应变等值面塑性区分布。由图 10 可知,方案 I 和方案 II 塑 性应变极值发生在过渡段开挖掌子面拱腰处,塑性区主要分布在小断面和过渡段初期开挖截面、过渡段 上右部分和土体临空面、大断面开挖掌子面,隧道开挖时土体卸载引起的土体位移会加剧塑性区的发展。 对比 2 种方案可知:方案 I 的门架支护能有效抑制过渡段横向扩挖导坑拱顶土体的塑性发展。



图 10 2 种加固方案下塑性区分布

5 隧道施工监测

5.1 监控量测点布置

后岭下隧道在变截面处围岩设计等级为Ⅳ级,现场开挖揭示,围岩节理发育,较为破碎,综合研判,横向扩挖采用支立门架法,上台阶高度控制在4~5m。针对该隧道小跨度段、变截面段、大跨段3个断面拱顶沉降现场监测数据整理出位移时程曲线,随着施工的推进对拱顶沉降与水平收敛进行监测,由于水平收敛变化较小,下面主要对拱顶沉降结果进行分析。

5.2 监控量测结果及分析

通过对比图 11 发现:隧道施工小跨度段处 DK43+110~DK43+140 区间内,隧道拱顶沉降最终值分 布在 15.90~19.27 mm 范围内;隧道施工变截面段处 DK43+150~DK43+160 区间内,隧道拱顶沉降最 终值分布在 12.09~17.20 mm 范围内;隧道施工大跨度段处 DK43+180~DK43+210 区间内,隧道拱顶 沉降最终值分布在 15.01~21.41 mm 范围内;各施工段中不同断面位移分布规律基本相似,隧道贯通后 拱顶沉降最大值与最小值相差分别为 17.5%、29.7%、29.9%,施工大跨度段与变截面段相似,且都大于 小跨度段。施工过程中拱顶的沉降位移规律都表现为早期急剧增长,中期缓慢增加,后期存在波动但是 较为稳定。模拟值和监测值变化的规律基本一致(见表 2)。过渡段横向扩挖采用支立门架法方案有效控

mm

制了由于隧道截面改变对隧道围岩稳定性的影响。



图 11 不同断面拱顶累计沉降及沉降变化率 表 2 拱顶沉降的模拟值与监测值对比

小跨度段			过渡段			大跨度段		
断面	实测值	模拟值	断面	实测值	模拟值	断面	实测值	模拟值
DK43+140	19.26	16.45	DK43+160	17.20	14.52	DK43+210	21.41	17.42
DK43+130	17.02	12.46	DK43+155	16.78	14.13	DK43+200	18.93	16.97
DK43+120	15.90	10.45	DK43+150	12.09	9.52	DK43+190	17.64	13.44
DK43+110	16.92	13.45	—	_	_	DK43+180	15.01	9.89

6 结论与建议

依托后岭下隧道,针对变截面开挖引起的围岩稳定性和力学特性进行了研究,结果表明:

(1)隧道过渡段采用三台阶临时仰拱法,并在过渡段上台阶内采用支立门架法完成横向扩挖的总体 方案,保障了变截面处工序的安全平顺转换,为横向扩挖提供了较大的作业空间。另外,支立门架法的防 护性进一步保证了大跨度横向扩挖的安全性,且门架作为永久支护的一部分也有效控制了洞身的沉降收 敛与应力变化。

(2)建议在围岩较为破碎的工况下,选用支立门架法;在围岩较完整的工况下,选用类似正洞台阶法。

(3) 三台阶临时仰拱内横向扩挖法的模拟值和监测值变化规律基本一致, 二者误差在允许范围内, 说明采用此种方案施工具有可行性。

参考文献

- [1]李利平,李术才,赵勇,等. 超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形机制与荷载释放演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2109-2118.
- [2]张成平,张顶立,王梦恕. 大断面隧道施工引起的上覆地铁隧道结构变形分析[J]. 岩土工程学报,2009,31(5): 805-810.
- [3]任东平. 铁路隧道三线分岔大跨段变截面施工技术[J]. 铁道建筑, 2021, 61(12):105-108.
- [4]杨迪,钱坤,童建军,等. 超大断面公路隧道工法转换施工力学特征研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1): 216-223.
- [5]洪军, 郭海满, 张俊儒, 等. 新考塘隧道出口三线渐变段结构选型与施工工法研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 953-959.
- [6]闫明超,曾鹏,何知思,等. 超大断面隧道变截面段施工技术研究[J]. 铁道建筑, 2015, 497(7): 43-45.
- [7]李红岩. 变截面与软流塑地层地铁渡线隧道施工技术研究 [D]. 长沙:中南大学, 2007.
- [8]方刚,丁春林,贾润枝,等. 变截面大跨隧道开挖施工力学特性分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 258-263.
- [9]黄林华,陈秋南. 基于非线性有限元的变截面隧道围岩稳定性研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2012, 22 (4): 61-64.

[10]付军恩.基于数值分析的区间渡线段隧道变截面施工方案比选[J].铁道建筑技术,2019,308(3):104-108.

[11]李涛,王益博,郁志伟,等. 变截面隧道开挖地表土体移动与沉降预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 433-444.

[12]廖雄.高地应力软岩大跨变截面隧道施工变形机理及其控制技术研究[D].成都:西南交通大学,2018. [13]梁中勇,饶军应,聂凯良,等.特大断面地铁车站变截面处暗挖施工技术[J].铁道建筑,2018,58(5):77-80.

Numerical Simulation Analysis of Large-Span Variable Section Tunnel Construction Method

Sun Yinhao

(No. 1 Engineering Co. Ltd. of China Railway 20th Bureau Group, Suzhou 215151, China)

Abstract: Aiming at the design characteristics of large span, long horizontal excavation size of variable section and high safety risk in the lead line section in Houlingxia Tunnel, the numerical simulation of two schemes of lateral transition excavation using the supporting gantry method and the quasi-cave step method for lateral transition excavation by three-step temporary inverted arch method was carried out, That is, the excavation of the upper step division within the 10 m transition section. The longitudinal first guide pit and the rear guide pit were excavated and vertical supports were erected, and the connecting beam was added longitudinally in the upper part of the fulcrum or the ring arch frame was connected longitudinally with channel steel. Then the middle vertical brace on the excavation side was removed to form a lateral excavation door hole. In the excavation construction, the support gantry method was used for protection or the quasi-cave step method for excavation. Finally, it was excavated to the arch foot, and the long main hole was connected to the arch frame to complete the construction of the upper steps of the transition section. The numerical simulation results show that both methods are safe and feasible. Combined with the actual situation of the surrounding rock on site, the project adopts the supporting gantry scheme to complete the excavation. The monitoring value of soil deformation around the cave is basically consistent with the variation law of the simulated value. The soil displacement and stress changes are less than the simulated values and within the allowable range. The successful implementation of this case might provide an important reference for the lateral excavation construction of similar largespan variable section tunnels, and has important practical significance.

Key words: large-span tunnel; variable cross-section; transverse expansion excavation; stability analysis of surrounding rock