

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.035

公路隧道断层破碎带围岩变形规律数值模拟

张晓勇

(河南省尧栾西高速公路建设有限公司, 河南 洛阳 471500)

摘要:为研究断层破碎带隧道施工围岩变形规律,采用数值模拟方法分别考查了台阶法、预留核心土法和三台阶法施工时围岩变形及地表沉降情况。结果表明:断层破碎带隧道施工围岩变形量随着荷载步增加趋于稳定,台阶法造成的拱顶沉降值较大,三台阶法和预留核心土法能较好的控制隧道拱顶沉降;隧道周边收敛值也随荷载步增加逐渐稳定,台阶法周边收敛值最大、三台阶法周边收敛值最小;地表沉降随荷载步增加逐渐达到稳定,台阶法施工造成的地表沉降最明显,三台阶法次之,预留核心土法地表沉降控制效果最好;预留核心土法隧道上方横向形成明显的沉降槽,随着荷载步增加沉降槽趋于明显,最终达到稳定。

关键词:公路隧道;断层破碎带;围岩变形;数值模拟

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0192-04

Numerical Simulation of Surrounding Rock Deformation in Fractured Zone of Highway Tunnel

ZHANG Xiaoyong

(He'nan Province Yaoluanxi Expressway Construction Co., Ltd., Luoyang, He'nan 471500, China)

Abstract: The excavation of soft rock tunnel in fractured fracture zone often causes large deformation of surrounding rock. To analyze the construction deformation in fault zone and broken rock tunnel, numerical simulation method is adopted to investigate the step method, core indigenous reserve and three step construction method of surrounding rock deformation and ground subsidence. The results show that the fault fracture zone construction of tunnel surrounding rock deformation tends to be stable with increasing load step, method of vault settlement value is large, the three step method and core indigenous reserve can better control the tunnel vault settlement; convergence surrounding values with increasing load step stable, step method of peripheral convergence maximum and three step method of peripheral convergence minimum; surface subsidence has gradually reached a steady state with the increase of load step, the maximum ground settlement caused by construction of the three step method. The second step, core indigenous reserve surface subsidence control effect best, reservation core soil above the tunnel transverse settlement trough was formed, and with the increase of loading step, the settlement tends to be obvious and finally reaches stability.

Keywords: highway tunnel; fractured zone; surrounding rock deformation; numerical simulation

我国地形地貌复杂,地质条件具有多样性,随着越来越多的公路隧道规划设计,隧道建设过程中遇到断层破碎带的概率明显增加,由于断层破碎带围岩较为软弱,强度与自承能力较低,因此断层破碎带地段隧道施工困难较大,施工过程中可能遭遇围岩变形过大、支护受力不均、塌方涌水等灾害,严重威

胁施工过程安全。关于断层破碎带处隧道研究较多^[1-8],探明断层破碎带隧道施工力学行为是确保施工安全的关键要素,在这方面学者们也做了大量研究,如孙兴亮等^[9]采用三维有限元方法研究了断层破碎带隧道施工过程,着重考察了超前小导管注浆加固对围岩的影响,结果显示注浆加固措施可保

证断层破碎带隧道施工安全;杨红军等^[10]采用数值方法分析了隧道断层破碎带对隧道施工期间拱顶位移、边墙主应力以及喷射混凝土内力的影响,认为断层破碎带处一定范围内拱顶位移影响较大,隧道拱顶和边墙发生塌方破坏的可能性最大;高啸也等^[11]选取了穿越断层破碎带且靠近水库的里程段为研究对象,系统介绍了通过隧道施工阶段的点荷载试验和监控量测资料来定量确定围岩分级各个指标的方法;宋瑞刚等^[12]认为深埋隧道断层破碎带围岩的失稳是一种突发破坏现象,进而结合总势能原理,分析了深埋隧道失稳破坏模式发生条件,建立了隧道的失稳突变模型,发现断层破碎带围岩的突发失稳与几何-力学参数 ζ 和综合刚度比 k 相关。

现有研究成果可为分析断层破碎带隧道施工过程中围岩稳定判定、支护方式选择及施工方法的选取提供参考,但由于断层破碎带地质条件的复杂性,不同工法的隧道开挖过程围岩变形规律尚需进一步研究。鉴于此,本文依托某断层破碎带地段的公路隧道,开展台阶法、预留核心土法和三台阶法施工条件下不同开挖步时掌子面附近围岩变形的数值模拟研究,探明断层破碎带公路隧道施工围岩变形规律,成果可为断层破碎带公路隧道施工围岩变形控制提供借鉴。

1 工程概况

依托隧道工程属于贵州省道真至新寨段的单洞双车道公路隧道,其中隧道上行线里程桩号为ZK155+211—ZK156+085,全长为874 m,最小埋深断面为12 m,最大埋深断面为105 m;下行线起讫里程桩号为YK155+215—YK156+111,全长为896 m,最小埋深断面为16 m,最大埋深断面为119 m,隧道开挖跨度约为11.9 m,高度10.6 m,根据设计资料隧道开挖依据新奥法理论,采用上、下两台阶施工,初支锚喷,二衬整体浇筑。隧址区为山脊复杂地貌,隧道线型总体由西向东逐渐展布,隧道入口处依靠边坡冲沟,高程约为880 m~920 m,自然边坡坡向约0°~30°。隧道出口位于山体冲沟部分,高程约为840 m~880 m,边坡坡向大致为10°~30°之间,隧道处地址条件多为第四系堆积粉质黏土,夹杂碎石,块石等,另外根据探测,隧道穿越一条断层破碎带,断层处围岩较为破碎,还存在地下水发育的情况,断层破碎带断面埋深约为20 m~30 m左右,隧道施工穿越断层破碎带时出现的围岩支护变形过大的问题(见图1),进而造成了钢拱架损毁、喷射混凝土脱落

和隧道上方的地表塌陷等灾害(见图2),另外施工时掌子面前方出现小型的突水突泥问题,严重威胁隧道施工安全。根据指挥部讨论以及现场超前地质预报结果,认为断层破碎带围岩较为软弱,并且存在裂隙水压,而支护强度仍然按照非断层破碎带施做,强度无法满足围岩压力承载要求,是造成围岩变形过大的主要原因。因此分析设计推荐的断层破碎带隧道台阶法施工时,掌子面附近围岩变形规律具有重要意义,同时对比分析预留核心土法和三台阶法与台阶法的适用性,成果可为支护设计提供基础资料,也可为施工过程安全预警提供参考。



图1 施工围岩变形过大



图2 围岩变形引起的地表塌陷

2 数值模拟

2.1 模型的建立

为研究断层破碎带地层隧道开挖掌子面附近围岩空间位移规律,采用有限元数值软件 ANSYS 建立模型,开展台阶法、预留核心土法和三台阶法施工过程的模拟,根据设计资料与现场施工情况,台阶法模拟中上下台阶高度分别取6.6 m和4 m,两台阶施工长度取为10 m,对比的预留核心土法中核心土高度为5 m,三台阶法台阶高度分别为3.6 m、3 m和4 m。隧道全长埋深深度不一,但断层破碎带处理深大约为20 m~30 m左右,为了充分反映隧道开挖的空间效应并考虑断层破碎带实际埋深,减小边界效应对结果的影响,所建立的模型沿隧道方向长度为64

m, 隧道两侧分别为 3~4 倍隧道直径取为 45 m, 隧道仰拱以下部分取为 30 m, 隧道拱顶以上取断层破碎带断面的平均埋置深度为 25 m。模型两侧侧面采用垂直该面水平位移约束, 底面为固定水平约束和竖向约束, 上表面设定为自由变形边界, 最终所建立的数值分析模型如图 3 所示。

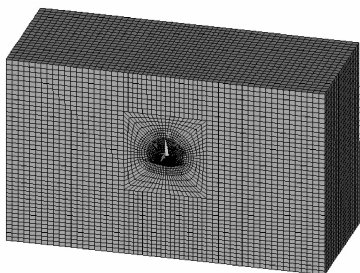


图 3 数值模型

2.2 单元类型

ANSYS 软件自带有多种结构模拟单元, 如杆、壳和实体单元, 可适应多种构件的模拟, 为与隧道实际情况更加接近, 模拟隧道开挖的复杂动态过程, 模型中使用的各类单元如图 4 所示, 衬砌采用 Solid 45 实体单元、锚杆采用 Link 8 杆单元、喷射混凝土采用 Shell 66 壳单元、围岩采用实体单元。计算模型采用地层结构法, 考虑地层与隧道结构的相互作用, 复合式衬砌支护采用弹性模型; 由于断层破碎带处围岩较为软弱破碎带, 施工中采用了超前小导管等加固手段, 按照规范^[13]要求将加固区围岩粘聚力适当提高 30%, 数值计算中未考虑钢筋网, 分析结果应是偏于安全的。

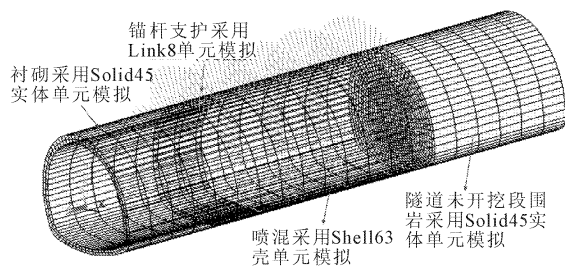


图 4 数值模型单元

2.3 材料参数选取

断层破碎带地段围岩较为软弱, 可采用室内饱和固结排水剪试验获得的破碎带力学参数^[14], 为充分模拟断层破碎带处围岩的非线性特征, 其本构模型采用 Drucker-Prager 模型, 结合设计资料与规范要求, 最终得到围岩与支护结构的计算参数见表 1。根据现有参考文献, 对于钢拱架支护模拟效果, 一般选用等效弹性模量法来计算, 其计算方法^[15]为:

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c} \quad (1)$$

式中: E_c 为考虑钢拱架后混凝土弹性模量, GPa; E_0 为初始混凝土弹性模量, GPa; A_s 为钢拱架截面面积, cm^2 ; E_s 为钢拱架弹性模量, GPa; A_c 为初始混凝土截面面积, cm^2 。

表 1 模型计算参数

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 ρ $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
破碎围岩	26.0	0.31	1600	30	20
加固部分	28.0	0.35	1700	39	20
锚杆	20.0×10^4	0.30	7800	—	—
初期支护	25.2×10^3	0.25	2200	—	—
二次衬砌	29.5×10^3	0.20	2300	—	—

3 结果分析

3.1 拱顶沉降

图 5 为三种不同施工工法时, 隧道拱顶沉降随荷载步的变化规律, 由图 5 可以看出, 3 种施工方法的拱顶沉降值随着荷载步增加均趋于稳定, 其中台阶法拱顶沉降值最大达到 66 mm, 三台阶法沉降值次之为 51 mm, 预留核心土法沉降值最小为 48 mm, 说明断层破碎带地段采用台阶法施工可能引起拱顶沉降过大问题, 三台阶法和预留核心土法可以达到控制围岩变形过大的问题, 施工时优先推荐三台阶法或预留核心土法, 仅从拱顶沉降控制来看, 预留核心土法效果优于三台阶法。通过现场实践结果来看, 起初采用的是推荐的台阶法施工, 当出现了围岩变形过大, 支护侵入建筑限界的情况, 后来采用了预留核心土法施工, 围岩控制效果较好, 与数值计算结果一致。

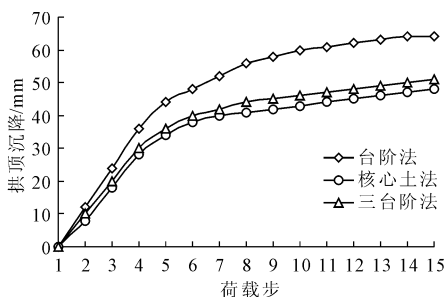


图 5 不同施工方法的拱顶沉降结果

3.2 周边收敛

图 6 为不同施工方法周边收敛结果随荷载步的变化规律, 由图可以看出, 随着荷载步增加, 周边收

敛结果也逐渐趋于稳定,说明周边收敛值随各支护措施的实施逐渐达到稳定状态。不同施工方法引起的周边收敛值不同,台阶法周边收敛最明显,施工稳定时达到 21 mm,预留核心土法次之为 19 mm,三台阶法控制效果最优,施工稳定收敛值仅为 17 mm,总体来看,三台阶法和预留核心土法要由于台阶法施工,但三种方法引起的周边收敛结果相差不是很大,即仅从周边收敛结果来看,三种方法均可以推荐。现场采用台阶法施工时,监控量测显示的周边收敛值也基本在 20 mm 左右,可见周边收敛并不是选择施工方法的主要控制因素。

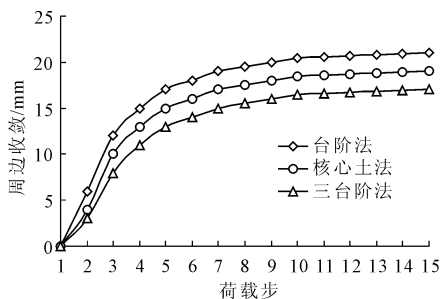


图 6 不同施工方法的周边收敛结果

3.3 地表沉降

图 7 为不同施工方法地表沉降随荷载步的变化规律,由图可以看出,地表沉降随隧道荷载步增加也逐渐达到稳定状态,说明隧道支护施做后地表沉降一般不会继续增大,不同施工方法对地表沉降控制的影响差异较大,台阶法开挖引起的地表沉降值最大达到 39 mm,三台阶法次之达到 28 mm,预留核心土法地表沉降控制效果最好,地表沉降值仅为 23 mm,从地表沉降控制结果来看,三台阶法和预留核心土法效果均比较好,但留核心土法控制效果最佳,因此推荐采用预留核心土法进行施工。综合隧道拱顶沉降结果和周边收敛结果,三台阶法和预留核心土法对拱顶沉降控制效果较好,三种方法引起的周边收敛相差不大,因此综合拱顶沉降、周边收敛和地表沉降分析结果,建议优先采用预留核心土法进行施工。

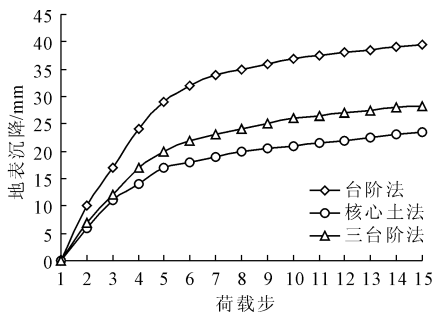


图 7 不同方法的地表沉降

现场断层破碎带施工时还发生了地表沉降过大的问题,隧道上方出现明显的塌陷,为了研究预留核心土法对地表横向沉降的影响,以预留核心土法为例,得到隧道上方横向地表沉降变化规律,如图 8 所示。由图 8 可以看出,隧道上方形成明显的沉降槽,且随着荷载步增加,沉降槽趋于明显,最终达到稳定,稳定时隧道正上方的最大地表沉降最明显,达到仅为 23 mm,且沉降槽基本在 1 倍隧道直径范围内,说明预留核心土法可优先控制地表横向沉降,满足施工要求。

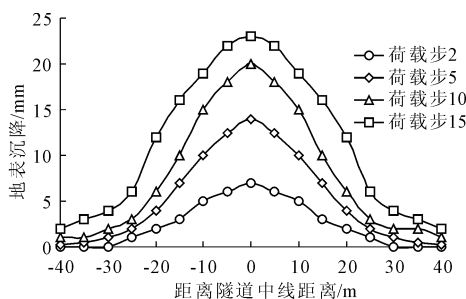


图 8 预留核心土法横向地表沉降

4 结论

(1) 断层破碎带处隧道施工会造成较大的扰动,随着荷载步增加,围岩变形量趋于稳定,不同施工方法造成的围岩总变形量不同,台阶法造成的拱顶沉降值较大,三台阶法和预留核心土法能较好的控制隧道拱顶沉降。

(2) 隧道周边收敛值也随荷载步增加逐渐稳定,台阶法周边收敛值最大、三台阶法周边收敛值最小,但整体上三种方法的周边收敛均较小,且结果相差不大。

(3) 地表沉降随荷载步增加也逐渐达到稳定状态,不同施工方法对地表沉降控制影响差别较大,台阶法开挖造成的地表沉降最明显,三台阶法次之,预留核心土法地表沉降控制效果最好。

(4) 预留核心土法隧道上方横向形成一定的沉降槽,且随着荷载步增加,沉降槽趋于明显,最终达到稳定,地表沉降值和沉降范围均满足施工要求。

参考文献:

[1] 崔金平.隧道穿越断层破碎带的小导管注浆处治研究[J].水利与建筑工程学报,2011,9(4):97-99.
 [2] 何川,李林,张景,等.隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J].岩土工程学报,2014,36(3):427-434.
 [3] 张佳.瑶寨隧道断层破碎带结构受力与变形特性分析[D].西安:长安大学,2013.

(上接第 195 页)

- [4] 黎盼. 断层破碎带地段隧道施工力学行为研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [5] 包德勇. 高压富水隧道断层破碎带突涌水分析与工程对策[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(5): 123-128.
- [6] 黄劲. 公路隧道富水断层破碎带施工风险评估[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [7] 彭超. 公路隧道穿越浅埋断层破碎带工程处理技术[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 134-138.
- [8] 祝云华. 复杂地质条件下隧道塌方处治分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 138-141.
- [9] 孙星亮, 侯永会. 断层破碎带隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(2): 9-12.
- [10] 杨红军, 方建勤. 隧道断层破碎带对隧道施工稳定性的影响研究[J]. 公路, 2009, 12(12): 196-200.
- [11] 高啸也, 黄锋, 彭焱森, 等. 断层破碎带隧道施工阶段围岩分级研究[J]. 公路, 2009, 12(12): 196-200.
- [12] 宋瑞刚, 张顶立, 文明. 穿越断层破碎带深埋隧道围岩失稳的突变理论分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 289-292.
- [13] 中华人民共和国. 公路隧道设计规范: JTGD 70—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] 扈世民, 张顶立, 郭婷, 等. 大断面黄土隧道变形特征分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 117-122.
- [15] Xiao J Z, Dai F C, Wei Y Q, et al. Cracking mechanism of secondary lining for a shallow and asymmetrically-loaded tunnel in loose deposits[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 232-240.