

大跨度公路隧道开挖过程三维模拟研究

赵春艳¹ 郝哲²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110004; 2. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁沈阳 110044)

【摘要】 采用 FLAC-3D 程序, 对大跨度公路隧道的开挖全过程进行了三维模拟, 给出了隧道开挖不同阶段的围岩应力、变形、塑性区的分布状态, 据此对隧道稳定性进行评价。通过开挖过程的三维数值模拟, 可了解大跨度隧道围岩应力分布、支护受力状态, 剖析施工过程中对围岩稳定的影响, 从而为合理调整支护参数和措施, 提供重要依据和参考。

【关键词】 大跨度公路隧道; 开挖过程; 数值模拟; FLAC 3D

【中图分类号】 U 455; TU 311.4 **【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.05.010

3D Simulation Study on Excavation Process of Big-span Road Tunnel

Zhao Chunyan¹ Hao Zhe²

(1. School of Resource and Civil engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China;

2. School of Architectural Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, Liaoning, China)

【Abstract】 By FLAC-3D, the whole process of excavation of big-span highway tunnel was simulated. Stress, deformation, plastic state of surrounding rocks at various phases were given. Stability of tunnel was evaluated. By the 3D simulation of excavation process, distribution of stresses and support can be known, influence on stability of surrounding rock in construction can be analyzed, and it can provide important references.

【Key words】 big-span highway tunnel; excavation process; numerical simulation; FLAC-3D

0 引言

隧道开挖是一个多步骤的、每次开挖都对以后各次产生重要影响的复杂过程^[1-2]。当前, 隧道开挖模拟存在的主要问题是: ①现行规范主要适用于跨度在 15 m 以内的隧道工程^[3], 对于三车道以上的大跨度公路隧道, 既无成熟的计算方法可遵循, 又无标准的设计规范可参照; ②公路隧道设计仍按二维模型考虑, 计算方法仍采用工程类比法和围岩松动荷载^[4], 建立在经验设计和“荷载-结构”模式基础上, 忽略了围岩本身也是结构这一重要特性; ③由于岩体复杂性与计算工具限制, 主要限于二维模拟^[5], 而实际上在开挖过程中, 前方是尚未开挖的地层, 后方是已开挖的洞室, 开挖面附近地层及结构的受力、变形情况与平面应变条件并不相符, 这是一个三维的空间问题。

沈大高速公路韩家岭隧道是目前我国乃至亚洲最大跨度的公路隧道^[6]。该隧道位于大连市金州区北部约 6.5 km 处, 隧道断面呈近似椭圆形, 开挖宽

度 21.64 m, 开挖高度 15.55 m, 属大跨度、低扁平率的公路隧道。隧道全长 521 m, 纵坡 1.6%。沿纵轴线长划分为 5 段: 进口明洞段、进口段、洞身段、出口段、出口明洞段。隧道洞顶埋深范围约 42~120 m。隧道施工采用新奥法台阶开挖。与一般隧道相比, 此类大跨度隧道跨高比大、扁平率低、受力状态不理想、稳定性差, 开挖面推进过程中的空间效应更为显著。

本文针对韩家岭隧道现场工序, 采用 FLAC-3D 程序模拟了大跨度公路隧道的三维开挖全过程。通过计算和分析开挖过程中和开挖结束时的位移场和应力场, 剖析开挖对围岩的影响, 对隧道的开挖稳定性进行综合评价。数值计算分析由 FLAC3D 3.00^[7-8]完成。

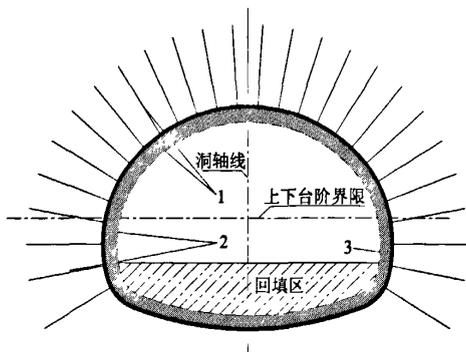
1 计算模型

1.1 现场开挖方法

韩家岭隧道施工的原设计方法为双侧壁导坑法, 在初期开挖时见围岩稳定性良好, 将实际的施工

方法由原设计转为正台阶开挖法^[9]:上台阶高 7.8 m,下台阶高 7.72 m;上下台阶工作面相距 48 m。由于施工方法的变更降低了工程造价,同时大大加快了施工进度。

现场实际开挖全程可分为 9 个循环,每个循环 3 步,见图 1。完成全长开挖并支护后,进行一次仰拱回填。据此,全程总计 28 个开挖步,即:1-①、1-②、1-③、2-①、……、9-③、10。



- 1—上台阶开挖及初期支护(每次进尺 2 m,共 24 个小循环);
2—下台阶开挖及初期支护(每次进尺 2 m,共 24 个小循环);
3—全断面二次衬砌(每次进尺 4 m,共 12 个小循环)

图 1 现场隧道台阶法开挖的 1 个循环过程

步骤①和②:施工进度为 1.5 循环/2d,每循环进尺 2.0 m。现场作业循环顺序为:钻孔→爆破→架设拱架→钻孔并安设锚杆(与拱架焊接在一起)→喷砼→出渣。钢拱架采用现场制作的 H 型钢,截面高度 18 cm,每榀由 6 节拼接在一起,两榀间距 0.5 m;钢拱架之间用 $\phi 22$ 钢拉杆联接,拉杆环向间距 300 mm,拉杆间用 $\phi 6$ 圆筋绑扎。锚喷支护参数为: $\phi 22$ 中空注浆锚杆,长 5.5 m 或 6 m,环距 1.5 m;25# 钢纤维喷射砼,厚 26 cm。

步骤③:施工进度为 1 循环/3d,每循环进尺 4 m。二衬采用 20 号模筑防水砼,厚 75 cm。

1.2 模型建立

考虑对称性,取隧道一半断面计算^[10]。模拟计算区域为:前、后边界取为隧道全长;左、右边界取为距原点 60 m;下边界取为距原点 51 m;上边界取为山体地表平均标高距原点 69 m,以便分析隧道开挖对地表的影响。边界条件设定为:① $x=0$ 、 $x=60$,边界 x 方向固定;② $z=-51$, z 方向固定; $z=69$,自由边界;③ $y=0$ 、 $y=424$, y 方向固定。

按弹塑性模型考虑,采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,利用增量理论计算。

围岩、锚杆、喷层和衬砌等材料的相关计算参数,依据实验室试验和地质报告提供的数据取值。

模拟程序直接针对现场开挖过程进行模拟。差分网格利用程序的三维网格生成器进行剖分,采用六面体八节点三维单元,对隧道开挖区域周边进行人工网格加密。得开挖前初始状态的单元数 130 592 个、节点数 145 249 个。单元类型确定:岩土体采用各向同性弹塑性材料,六边形八节点单元;锚杆采用 cable 结构单元;喷混凝土和二次衬砌采用壳体单元;回填土采用各向同性弹塑性平面材料。

开挖步 1-①的网格形态见图 2。

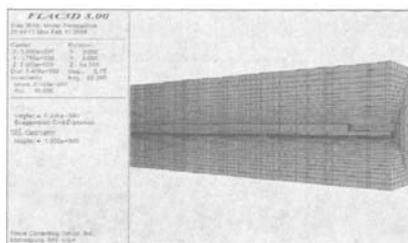


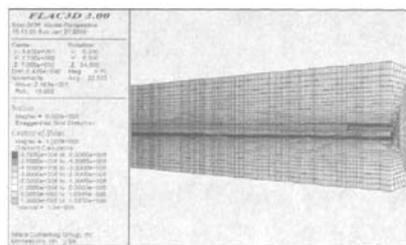
图 2 1-①步网格

2 程序模拟

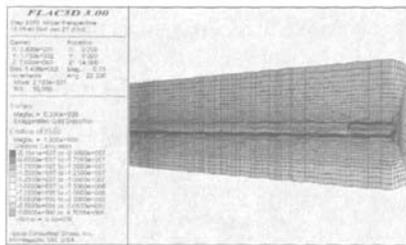
用 FISH 语言编写 FLAC-3D 模拟程序,进行开挖过程模拟分析。

2.1 应力云图

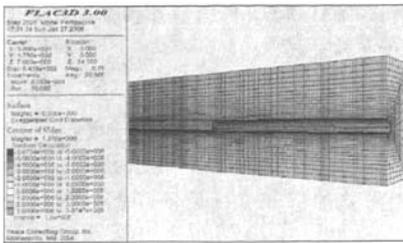
几个开挖步终止时的最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 云图见图 3。



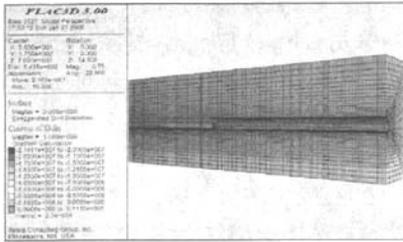
(a) 1-①- σ_1 图



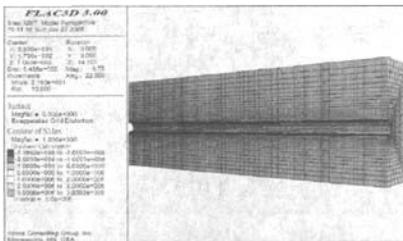
(b) 1-①- σ_3 图



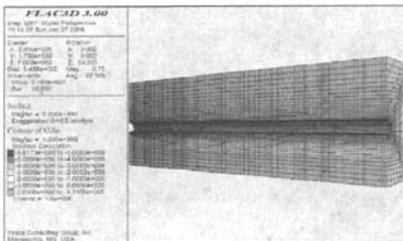
(c) 5-2- σ_1 图



(d) 5-2- σ_3 图



(e) 9-3- σ_1 图

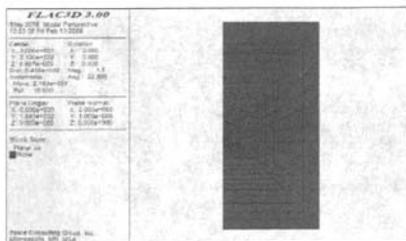


(f) 9-3- σ_3 图

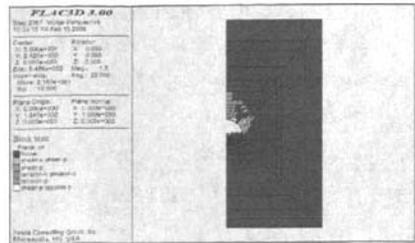
图3 典型开挖步的 σ_1 和 σ_3 云图

2.2 弹塑性状态图

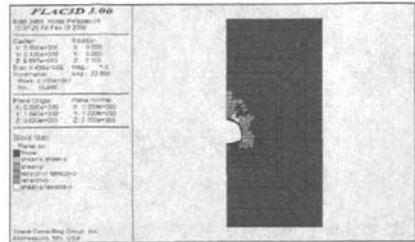
184.5 m进尺断面在几个开挖步的弹塑性状态图(State)见图4,显示出None(弹性)、Shear-n(现剪切破坏)、Tension-n(现拉伸破坏)、Shear-p(曾剪切破坏)、Tension-p(曾拉伸破坏)等不同的单元状态。



(a) 1-1-state图



(b) 4-1-state图

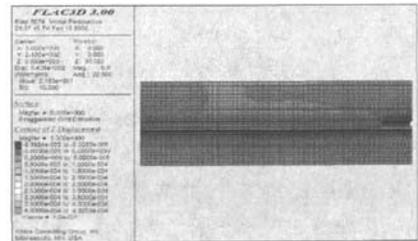


(c) 5-1-state图

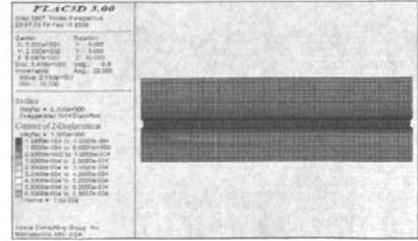
图4 典型开挖步的弹塑性状态图

2.3 位移云图

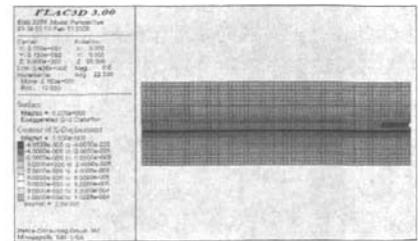
几个开挖步的位移云图见图5,包括:垂直位移图(zdis)、横向位移图(xdis)和轴向位移图(ydis)。



(a) 1-1-zdis图



(b) 9-3-zdis图



(c) 1-1-xdis图

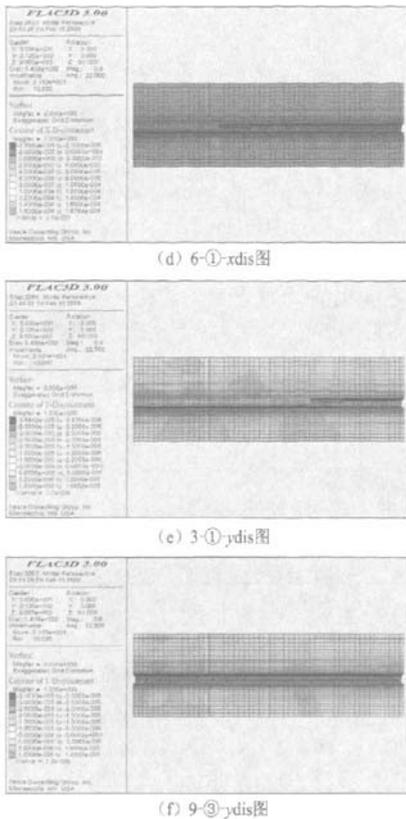


图5 典型开挖步的位移云图

3 计算结果分析

3.1 应力分布

从应力云图和塑性区分布图可以看出:

1)第一次开挖(1-①步)对应力状态的影响最大,此时在开挖边界产生了严重的应力集中,并有受拉和剪切塑性区出现。隧道已开挖部分的拱顶、拱脚、墙腰和底板是应力集中程度较大的位置。

2)②阶段(下台阶开挖)对隧道上台阶围岩的应力分布产生显著影响,此时应力集中程度有所降低,就隧道周边而言,对墙腰影响较大。但仅靠上、下台阶的初期支护不足以维持稳定,因此必须施作③阶段(全断面二次衬砌)。

3)随着开挖的进行,主应力的分布不断改变,在被开挖位置处的应力达最大,而已开挖完毕的之前循环的断面应力分布基本没什么改变。就 K344+820.0 断面而言,前 3 个循环的开挖均未产生塑性区,这说明隧道开挖对岩体影响仅在距被研究目标面较近的情况下才较显著。

4)各开挖阶段的围岩塑性区主要集中在周边,但由于锚杆和喷射砼的存在,拉裂区向深部转移,在

分布上个别塑性区还出现了不连续现象。产生这种现象的原因是锚杆端头应力集中,这种现象是符合锚杆作用机理的。

5)在开挖进尺的附近断面(一般距目标面 25 m 左右),塑性区开始出现,当开挖至目标断面时,主应力达最大值。分析表明,初期支护是能保持隧道上台阶开挖稳定性的。但是隧道开挖后不及时支护,冒顶、片帮在所难免,不可能安全地进行下台阶步开挖。

6)目标监测面前后一个循环范围内,应力受到较大影响,塑性区产生较大变化,而再往后,拱肩的最小主应力继续增大外(也能产生塑性区),其余位置最大、最小主应力基本不再变化。进一步序计算表明,隧道开挖产生的塑性区对围岩的影响较大区域仅在目标面前、后的 14 个小循环范围内(即 28 m),这也表明了开挖面对隧道围岩开挖的虚拟支撑作用程度。

7)第 10 步,完成隧道全长的仰拱回填后,主应力分布变化不大,这是由于回填土层参数较弱,对应力分布影响很小。

3.2 位移分布

3.2.1 纵向分布

从 zdis 图可以看出:

1)1-①开挖后,隧道周边位移达最大值,位置在拱顶;拱顶沉降约为底板回弹的 2 倍左右,拱顶应作为周边位移分析的重点。位移值随着距隧道渐远而衰减。位移值沿隧道全长推进。

2)上部台阶开挖引起的位移改变远大于下部台阶开挖,而下台阶开挖和全断面二次支护引起的沉降值相差不多。因此,上部台阶开挖应作为施工控制的重点。

3)随着开挖的进行,隧道周边位移值逐渐向深部扩展,但增长不快。从 9-③-zdis 图可见,由于开挖过程的影响,隧道的位移图并不完全对称,说明传统按照平面应变问题考虑隧道工程有一定近似性,但开挖全长的中部左右的位移图较为均匀,因此建议若按照平面问题分析隧道,应考虑在沿轴线中部区域更为合适。

3.2.2 横向分布

从 xdis 图可以看出:

1)xdis 沿隧道轴线方向的分布较 zdis 要均匀得多,水平变形远小于垂直变形。

2)xdis 在拱脚处最大,沿着周边衰减,且沿深度有一定扩展,深入不大。

3)xdis 随着开挖的进行,其值变化不大,不如

zdis 剧烈。

3.2.3 轴向分布

ydis 反映出开挖引起的沿隧道轴线方向的变形情况,一般不考虑。从 ydis 图可以看出:ydis 沿开挖纵轴线的分布不太规律,但变化值不大。分析造成误差的原因是:①沿 y 方向施加水平约束导致了该方向较复杂的位移分布状态;②由于喷层、锚杆和模筑混凝土的影响。

4 结论

从数值模拟结果可见,采用三维非线性弹塑性分析程序 FLAC-3D 可以较好地模拟大跨度隧道开挖过程,并满足稳定性分析的需要。

就隧道的应力分布来看,不支护或仅初期支护难以满足稳定性要求,可能导致隧道局部的冒顶或片帮,从而引起隧道的局部破坏,危及施工人员的安全,甚至可能影响隧道的整体稳定性,因此上分层开挖并初支→下分层开挖并初支→全断面作二次衬砌的开挖循环缺一不可。在各次循环完成①→③的完整过程后,隧道全部单元退出塑性状态,即围岩是稳定的;就位移情况来看,位移收敛值在允许范围内,也说明围岩是稳定的。现场隧道在开挖和运营过程中,未发现有塌方等事故发生,证实了围岩的确处于稳定工作状态。

模拟分析结果证实了大跨度公路隧道采用台阶法施工的可行性和合理性。三维数值模拟结果对于预测和指导现场施工有重要参考价值,研究方法和结论对类似大跨度隧道的设计和分析也具有较大借

鉴意义。

参考文献

- [1] 于学馥,等. 岩石记忆与开挖理论[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.
- [2] Hoek E, Brown E T. Underground excavation in rock [M]. London: The Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [3] 中华人民共和国交通部. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 朱汉华. 公路隧道围岩稳定与支护技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [5] F. Y. Hsiao, C. L. Wang b, J. C. Chern . Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(1):14-21.
- [6] 郝 哲. 大跨度公路隧道开挖过程力学特性研究(辽宁工程技术大学博士后研究报告)[R]. 2007: 27-28.
- [7] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC 3D User Manuals, Version 3. 0[M]. Minneapolis, Minnesota, 2004.
- [8] 刘 波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [9] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [10] 夏永旭,王永东. 隧道结构力学计算[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

收稿日期:2009-08-21