

文章编号: 1000-7598-(2002)06-0673-05

凤岗隧洞三维非线性仿真模拟

白世伟¹, 林鲁生², 徐邦树³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 东深供水改造工程指挥部, 广东 东莞 510000;
3. 山东科技大学, 山东 泰安 271000)

摘要: 针对凤岗隧洞 V 类围岩进行了三维非线性仿真模拟, 提出了软岩洞室开挖产生空腔效应和损伤弱化效应, 建立用塑性区参数弱化的方法拟合收敛变形取得了较好的效果。还讨论了空间效应、加固效应以及施工优化方案, 论证了隧洞的稳定性。

关键词: 隧洞; 三维非线性; 仿真计算

中图分类号: TU 279; TB 115 **文献标识码:** A

Three-dimensional nonlinear simulation for Fenggang tunnel

BAI Shi-wei¹, LIN Lu-sheng^{1,2}, XU Bang-shu³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Headquarters of Dongshen Water Supply Project Reformation, Dongguan 510000, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China)

Abstract: In light of the surrounding rock mass of class V of Fenggang tunnel, a three-dimensional nonlinear simulation for it has been carried out. The cavity effect and the damage softening effect induced by excavating the tunnel in soft rock mass, have been presented. And the fitting of convergent deformation is effectively established by using the parameters softening method for plastic zone. Finally, the space effect, reinforcing effect as well as the optimizing construction scheme are also discussed; and the stability of the tunnel is demonstrated too.

Key words: tunnel; three-dimensional nonlinearity; simulation calculation

1 引言

东深供水工程是为解决香港、深圳及沿线城镇用水而建设的跨流域大型调水工程。原供水线路全长约 80 km。为保证供水水质, 并适当增加供水能力, 以解决深圳市和东莞市沿线地区用水的要求。对东深供水工程进行全面改造, 采用全封闭输水方案。

东深供水改造工程凤岗隧洞段岩性为侏罗系中统塘厦群上亚群粉砂岩夹长石石英砂岩, 石炭系下统测水段炭质页岩、炭质粉砂岩及砂页岩、侏罗系上统钠长斑岩(次火山岩)。钠长斑岩分布于整条隧洞。隧洞施工过程中进行了实时位移监测, 本文对凤岗隧洞 (J9+618) 断面为代表的 V 类围岩进行了三维非线性仿真模拟, 为工程设计施工得到一系列有益的结果。

2 模型概述

2.1 研究目的

在各种工况下, 三维弹塑性数值模拟真实环境开挖和支护的全过程, 隧洞围岩的变形过程、应力释放重分布情况, 即围岩变形的空间效应和加固效应。

进一步完善设计与施工理论。督促施工单位进行施工期安全监测, 指导安全施工。进行掌握衬砌的工作状态与安全性能, 为建设指挥部进行工程验收提供参考资料。

2.2 分析程序

采用三维快速拉格朗日分析程序 Flac-3D, 该程序能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为。能很好模拟变形、应力的空间效应和加固效应。

2.3 模型

本构关系采用摩尔-库仑准则。围岩采用三维六面体单元，共划分 9 300 个单元。计算网络划分如图 1。

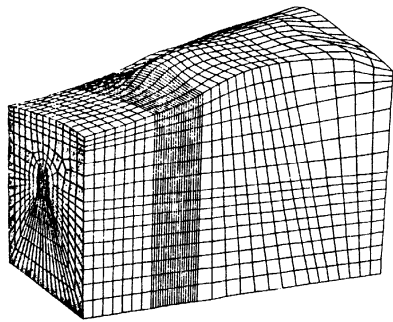


图 1 有限差分模型网格图
Fig.1 Mesh map for finite difference model

锚杆采用一维杆单元，在三维快速拉格朗日法中用锚单元来模拟锚固作用，锚单元是双节点的直线单元，每个节点只有沿单元轴向的一个自由度，一根实际的锚索可分为若干锚单元，锚单元可沿其轴向产生张拉变形并发生屈服。锚单元的节点可以与实体单元间产生相对位移，二者间设置模拟灌浆作用的接触参数 f, c, k ，分别表示摩擦系数、凝聚力、刚度。锚单元与岩体间可以发生剪切屈服，产生滑动直至拉拔破坏。通过设置不同的接触模式及参数可以模拟自由锚、粘结锚、预应力锚等各种锚与岩体的相互作用，从而达到模拟锚固作用的目的。锚杆单元示于图 2。

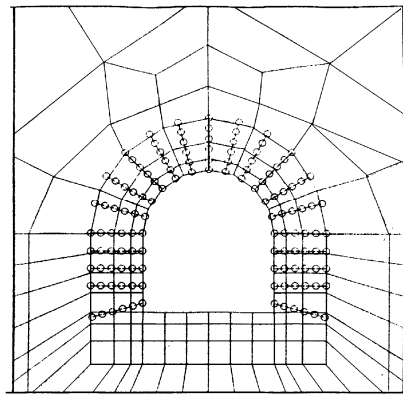


图 2 6 号断面锚杆布置图
Fig.2 Arrangement of anchor bars in section No.6

2.4 初始应力场

考虑到凤岗隧洞地处丘陵，低山地区，隧洞为复盖不深的浅埋隧洞，因此只考虑重力场形成围岩的初始应力场。

2.5 围岩力学参数

根据平面反分析及部份试验结果得到如下力学参数。见表 1。

表 1 围岩力学参数
Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock mass

参 数	弹性模量 / GPa	粘聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	泊松比	密度 / kg · m ⁻³	抗压强度 / MPa
围岩	2	0.4	27	0.24	26.5	0.25
断层岩石	0.6	0.07	24	0.32	26.0	0.04
喷层	2.8	10	35	0.25	27.0	6

3 计算模拟

计算拟合通常采用逐步调整参数试算，但正确认识隧洞围岩变形的物理过程非常重要。通常有限元计算或有限元反分析一旦选定了计算参数和描述岩体的力学模型之后，立刻就能算出围岩的变形量，但是，很多情况下计算得到的变形量总是比实际收敛变形监测值小，有时还小很多。对于比较硬但破碎的岩体，常有这种尴尬的现象出现(前提是监测准确和即时进行的，不考虑滞后观测造成变形量丢失情况)。为了拟合变形，常常采用降低围岩的力学参数或者考虑采用可产生更大变形的材料本构模型(塑性、粘性、流变特性等等)，不仅计算非常复杂，收效也不一定好。事实上，隧洞开挖之后，围岩变形的物理过程值得研究，对于碎裂岩体开挖之后，在本来应力平衡的初始岩体中形成空腔，如果应力较高或岩石较差的话，应力扰动形成塑性区，区内岩体裂隙会扩展、贯通甚至岩块错动。宏观上表现为该区域岩体强度进一步降低，产生损伤弱化，这一过程导致宏观上围岩进一步的变形(收敛变形)。由此产生的变形不妨称为损伤弱化变形。通常的计算分析没有反映这个变形，已有的经典本构模型尚不能模拟概括这一现象，如果把开挖卸荷引起的变形看成是空腔效应的话，则塑性区(或破损区)岩体在应力场持续作用下进一步变形破坏称为损伤弱化效应，收敛变形值是空腔效应同损伤弱化效应之和。基于上述的认识，本文的计算采用了一个简单的方法来模拟这个过程，即对开挖引起隧洞变形和应力

调整之后, 对塑性区的围岩进行参数弱化, 计算在相同初始应力场作用下, 由此导致的围岩变形。在三维计算中用这一办法进行仿真模拟。下面分析计算结果时将进一步讨论这个问题。

计算拟合的第二个问题是尽可能反映工程设计、施工的特征, 对不同施工程序导致的后果加以比较, 由此寻求合理、科学的设计施工方案, 对上、下两个台阶开挖和全断面开挖两种不同的施工方法进行了比较, 同时还对不同开挖步长进行了比较。在考虑空腔效应的同时考虑了损伤弱化效应和加固效应的影响。

文中对步距为 5 m, 全断面开挖条件下的 3 种工况进行计算, 对步距为 2 m, 分上下台阶开挖条件下的 3 种工况也进行了计算。分上下台阶开挖的步序如图 3。

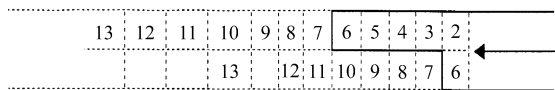


图3 分上下台阶开挖情况下的开挖顺序和步距

Fig.3 Excavation procedure and step-span for the condition of excavation with upper step and lower step

6 种工况分别是

工况 1 全断面开挖, 毛洞、岩体未弱化。

工况 2 全面开挖, 毛洞、隧洞周边围岩弱化。

工况 3 全断面开挖, 弱化、喷层加锚杆支护。

工况 4 上下台阶开挖, 毛洞、岩体未弱化。

工况 5 上下台阶开挖, 毛洞、隧洞周边围岩弱化。

工况 6 上下台阶开挖, 弱化、喷层加锚杆支护。

4 数值仿真模拟及成果分析

4.1 围岩收敛变形拟合

现场采用 RSM-3 型机械式收敛计进行围岩变形监测。测桩布置如图 3, 武汉水电大工程监理有限公司提供 6 号断面(J9+618.675)监测变形过程曲线如图 4。

图 6 和图 7 示出全断面开挖时 B 点及 D 点的收敛变形过程曲线, 同实测曲线相比较可以看出: 上测点 B, C 平均水平位移约 6 mm, 下测点 D, E 平均水平位移约 8.3 mm。工况 1 情况下对应点的水平位移比实测值小得多, 工况 2 情况下上、下测点计算值分别为 6.9 mm 和 8.14 mm, 工况 3 情况下上、下测点计算值分别为 6.26 mm 和 7.4 mm, 工况 2 和

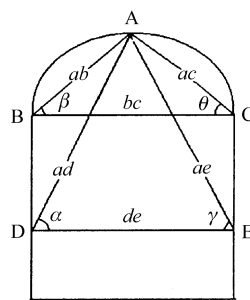


图4 测桩布置图

Fig.4 Arrangement of measuring piles

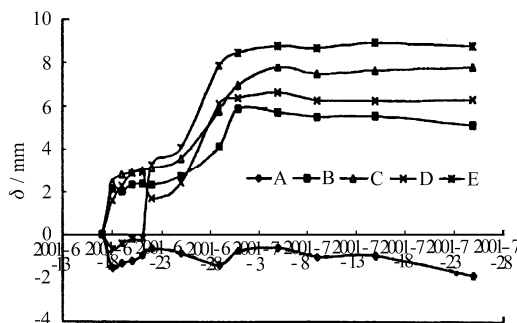


图5 6号断面收敛变形监测曲线图

Fig.5 Monitoring curves of convergent deformations in section No.6

工况 3 基本上反映了隧洞围岩的力学特性, 仿真计算结果同实测资料基本吻合。变形的发展过程观测曲线同计算曲线规律也相同。

工况 1 未考虑破损弱化效应, 计算变形量比现场监测结果小得多, 这表明只考虑空腔效应是不够的。对于比较软弱破碎的围岩必须注意破损弱化效应作用, 在隧洞周边形成的破损区如果未能及时支护加以控制, 它将随着应力调整的过程持续发生变形, 表现为收敛变形在一段时间的逐步发展, 工况 2 就反映了损伤弱化效应的影响。

损伤弱化力学过程非常复杂, 严格说来还没有比较成熟的理论描述这一过程。研究人员从不同角度采用不同的方法去反映这一过程。例如采用可反映损伤过程的力学模型, 反映流变效应的蠕变模型, 以及其它的非线性分析方法。也可把围岩划分为松动区、塑性区、弹性区等多重壳层结构介质的近似方法。本文采用塑性区岩体力学参数弱化的方法是一个简化的模拟方法, 但计算的效果令人满意。

4.2 空间效应

图 6, 7 显示, 隧洞开挖到观测断面之前, 围岩的应力已经受到扰动, 引起相应的变形, 工作面是应力集中的区域, 因此出现反向变形现象, 由于约束作用, 量级较小。一旦通过观测断面的时候, 变形迅速释放。

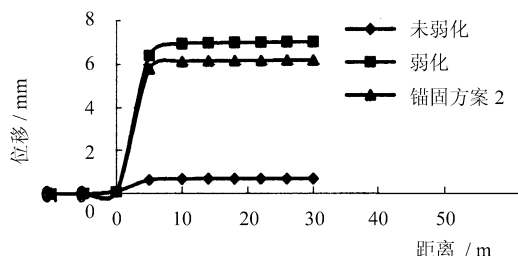


图 6 观测点 B 在各种工况下开挖距离与数值位移关系曲线图

Fig.6 Relationships between excavation distances and numerical displacements at observed point B under different working conditions

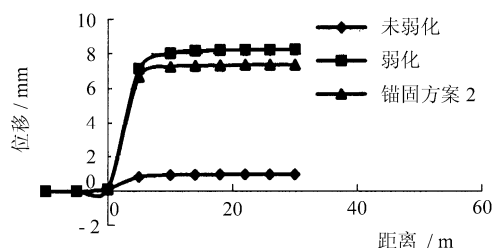


图 7 观测点 D 在各种工况下开挖距离与数值位移关系曲线图

Fig.7 Relationships between excavation distances and numerical displacements at observed point D under different working conditions

随着工作面的推进, 变形速率逐步减缓, 直到趋近于零, 变形随着工作面远离一定距离以后才逐步稳定下来。由于施工扰动应力场引起应力调整, 逐步开挖产生的应力扰动会逐次叠加, 当工作面愈来愈远, 扰动也愈来愈小直至为零, 这就是空间效应, 一般说来大约是洞径 2 倍。比较图 6、图 7 及图 5, 影响范围约 18 m, 观测结果同计算结果基本一致。

图 8, 9 反映了工况 4~6 分上下台阶开挖, 对应上台阶开挖的 B, D 测点位移。图 9 表明下台阶开挖推进尚不够远, 收敛变形尚未完成, 即还在空间效应的影响区。图 8 所示上测点上台阶开挖已远离约 28 m, 但下台阶离测点 12 m, 因此变形已基

本释放, 但尚未完全稳定, 表现的趋势同全断面开挖是一致的。

对于流变特性明显的软岩, 在恒定应力作用下岩体有明显的随时间增长的持续变形(蠕变)。但本隧道的变形监测一般在通过空间效应影响区(约洞径 2 倍)后, 收敛变形趋近于零, 因此可以排出流变因素的影响。

4.3 施工优化

工况 1~3 反映全断面开挖的情况, 工况 4~6 反映分上下台阶分区开挖, 将图 6, 7 同图 8, 9 对比, 可以看出变形过程或变形规律基本相同。但采用分上下台阶分区开挖产生的变形量明显减少。如果隧洞周围岩体坚硬完整, 基本上可用弹性介质来描述的话, 开挖方式不论怎样变, 应力场的叠加或变形的积累符合叠加原理, 两种施工方式得到的最终的应力场和变形量都应该相同。但是对于软岩, 应力-应变关系是非线性的, 变形不仅同应力大小有关, 而且同应力历史或应力路径有关, 伴随应力调整产生的是一个非线性不可逆的能量耗散过程, 因不同的施工程序可以导致不同的终极应力场和不同的收敛变形量, 此处采用分上下台阶分步开挖优化了围岩的应力状态, 减少了收敛变形值, 增加了隧道的稳定性。

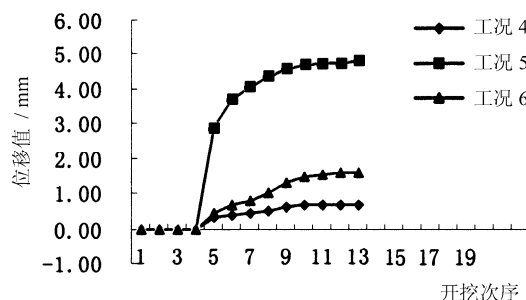


图 8 测点 B 位移值

Fig.8 Values of displacements at measuring point B

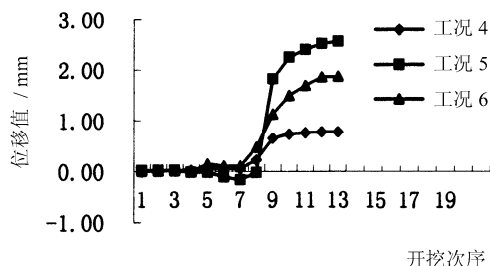


图 9 测点 F 位移值

Fig.9 Values of displacements at measuring point F

工况 4~6 不仅考虑了分上下台阶分区开挖,而且开挖步距从 5 m 减少到 2 m。从收敛变形量看,分步开挖的围岩变形量减少,对于锚杆加固的隧道围岩,收敛变形进一步减少,表明可以通过调整开挖步距进一步使围岩应力状态优化,增加稳定性。从实际施工可行性看,5 m 步距太长,采用 2~3 m 步长基本上是可行的。

上述计算成果的对比表明,施工优化大有可为,对于非线性软岩,可采用分部开挖,短步距开挖等施工工艺的调整,减少对围岩的应力扰动影响,减少隧洞收敛变形,增加安全储备。

4.4 锚固效应

对比各种工况可见,围岩锚固以后收敛变形受到约束,由此产生的收敛变形量小于未加固围岩产生的收敛变形。并且全断面开挖步距 5 m 条件下锚杆加固对变形的约束没有分步开挖 2 m 步距条件下锚杆发挥的作用大,这个结论是显然的。因为前者让工作面推进 5 m 以后才施作锚杆,而这时恰好是围岩急剧变形阶段,也是急剧损伤弱化阶段,对该区间的变形发展未加约束,必然产生较大的收敛变形。而工况 4~6 反映分上下台阶开挖,且步距仅为 2 m。即上台阶开挖 2 m 下台阶尚未开挖的局部变形释放条件下就进行锚杆加固,因此变形控制效果更好。

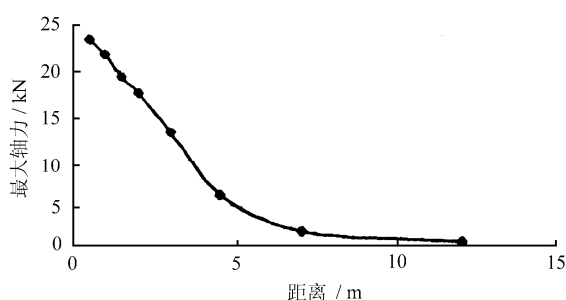


图 10 最大轴力与锚杆施作离工作面距离关系
Fig.10 Relationship between maximum axial forces and distances from anchor bar to working surface

当然,变形控制是以锚杆受力为代价的,如果锚杆施作早,限制变形的作用发挥得愈充分,锚杆受力愈大。如果既约束了围岩的变形,锚杆受力又在容许范围之内,则两全其美。图 10 显示的是离开工作面不同距离处开始打入锚杆,所得锚杆最大轴

力的关系曲线。在工作面后方 2~3 m 处开始喷锚加固既约束了变形,锚杆受力又在安全范围以内,的确达到了这样的效果。

5 结 论

(1) 软弱破碎岩体中开挖隧洞,收敛变形由空腔效应和损伤弱化效应两部份组成,认识这一物理过程是拟合变形的关键。损伤弱化效应的力学机制非常复杂,本文采用一种弱化塑性区岩体力学参数的简化方法,收到较好的效果。

(2) 凤岗隧洞 V 类围岩通过平面反分析拟合的方法获得一套力学参数,用于三维仿真计算同实测收敛变形值基本吻合。由此表明上述力学参数基本上反映了围岩的力学特性。

(3) 空间效应影响范围大约 2 倍洞径。超过这一范围后,收敛值趋于稳定,表明围岩的流变特性不明显。

(4) 采用分上下断面分步开挖,缩少步距等优化施工方法可使隧洞收敛变形减小,稳定性增加,施作锚杆更进一步提高了安全性能。从锚杆轴力分析计算可见隧洞支护合理,并有一定的安全储备。

致谢: 本研究项目得到广东省东江——深圳供水改造工程总指挥部的资助,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 科学出版社. 1996.
- [2] 王卫军, 侯朝炯. 软岩巷道支护参数优化与工程实践[J]. 岩石力学与工程学报. 2000. 19(5): 647—650.
- [3] 杨志法, 熊顺成, 王存玉等. 关于位移反分析的某些考虑. 岩石力学与工程学报[J]. 1995, 14(1): 11—16.
- [4] 陈锋, 林鲁生, 白世伟等. 东深供水改造工程凤岗隧洞段岩体参数位移反分析. 岩土力学[J]. 2002. 23(5): 657—660.