

文章编号:1673-0062(2011)01-0028-05

高应力软岩隧道施工的时空效应分析

桂 荣,刘 永

(南华大学 核资源与核燃料工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:以湖南某高应力软岩隧道为背景,应用有限元软件 ABAQUS 对其施工的时空效应进行了分析,并对其影响范围及大小进行了研究,结果表明:高应力软岩隧道围岩稳定很大程度上受到隧道的“空间效应”及“时间效应”的影响,同时指出在施工时应尽早施加初期支护提高围岩自承能力,在围岩变形趋于稳定时施加二次支护坚决抑制软岩的流变所引起的大变形。

关键词:高应力软岩;围岩稳定;三维数值分析;流变;时空效应

中图分类号:TU457

文献标识码:B

Analysis on the Excavation and Support of High Stress Soft Surrounding Rock Tunnel Considering Time-space Effect

GUI Rong, LIU Yong

(School of Nuclear Resources and Nuclear Fuel Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: This paper is based on the high stress soft rock tunnel in Hunan. The space-time effect of the construction process is analyzed with the finite element software ABAQUS, and the scope and size of effect to the surrounding rock is studied. The results show that: the stability of the soft surrounding rock is greatly affected by the “space effect” and “time effect”. During the process of constructing the tunnel in high stress soft rock, the first support structure should be established as soon as possible in order to improve the self-bearing capability of the surrounding rock. And the secondary support structure must be established when the deformation of the surrounding rock keeps stable to suppress the large deformation of surrounding rocks for the rheological properties of soft rock.

key words: high stress soft rock; stability of surrounding rock; 3-D numerical analysis; rheological Properties; time-space effect

收稿日期:2011-01-07

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(07JJ6167)

作者简介:桂 荣(1984-),男,湖南省祁阳人,南华大学核资源与核燃料工程学院助教,硕士. 主要研究方向:隧道结构稳定及灾害预防.

0 引 言

在高应力软岩中修建隧道,由于软岩自稳能力差、塑性变形大,且具有明显的流变性,如对围岩变形、应力变化规律不了解或支护结构不合理,往往会发生过量变形而使隧道坍塌.软岩隧道围岩稳定很大程度上受到“空间效应”及“时间效应”影响,因此在进行软岩隧道施工的设计与施工时既要考虑开挖面空间约束效应,同时还需要考虑软岩流变的时效特性.

在分析具有明显流变效应的隧道开挖问题时,常采用弹—塑性有限单元法^[1].目前,对软岩隧道的设计和施工中考虑开挖空间效应和时间效应相互耦合的三维时空效应还很少,而且由于高软岩隧道施工较为复杂,受地质条件和施工因素的影响较大,使得软岩隧道开挖过程中支护结构和围岩随着时间和空间的变化而产生的变形特性极为复杂^[2].本文在前人基础上,采用有限元软件 ABAQUS 建立三维模型对某高应力隧道施工过程及支护情况进行模拟分析.通过分析得出开挖后围岩应力、位移分布规律,探讨软岩隧道施工的时空效应,为隧道的顺利施工提出警示信息和直接指导,同时为优化隧道设计提供理论基础.

1 工程概况

该隧道位于湖南省衡阳市境内,为高速公路隧道.分左右两线,左线全长 2 155 m;右线全长为 2 160 m,隧道线间距约为 30 m.隧道最大埋置深度约 344 m,一般埋深约 200 ~ 300 m.深埋段岩层主要由强风化千枚岩和弱风化千枚岩组成,且分布有断层破碎带,属Ⅲ、Ⅳ类软弱围岩,施工相对较困难.经综合分析比较,深埋段采用三心曲墙式衬砌,隧道断面如下图 1 所示.

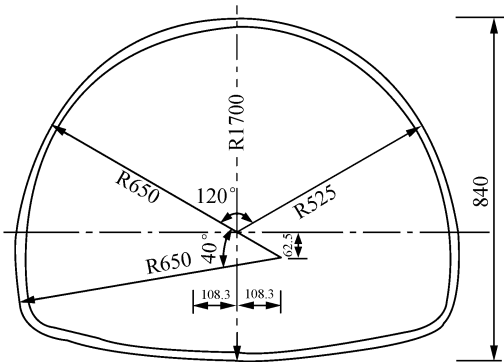


图 1 隧道断面形状
Fig. 1 Section form of the tunnel

取左线 ZK105 + 860 至 ZK105 + 920 段作为分析对象,平均埋深 280 m,围岩等级为Ⅳ级,此段为高地应力、大变形软岩,次生结构面发育、挤压现象明显,且伴有明显的扭曲现象,给隧道设计和施工带来极大的困难.拟采用光面爆破进行全断面法开挖,每次掘进 2 m,采用 S4 型复合式衬砌结构,初次衬砌为锚喷支护:喷射 10 cm 厚 C20 砼,挂 20 × 20 cmφ6 钢筋网,拱顶部位按梅花形(1.0 m × 2.0 m)布置长 2.5 m 锚杆,开挖完成后立即进行初次支护,二次支护采用整体式模筑,为 300 mm 厚 C40、S8 防水钢筋混凝土结构.同时利用各种类型的收敛计对隧道断面的收敛情况进行量测.

2 软岩隧道时空效应综合分析

2.1 模型的建立

结合该隧道深埋段断面形状,利用 ABAQUS 建立三维有限元模型.隧道模型上下左右各取 3 倍隧道直径,沿隧道轴线方向取 6 倍隧道直径.模型岩体材料特性按均质弹塑性考虑,采用 Drucker-Prager 屈服准则.岩体单元为 C3D8R,衬砌单元为 S4R,锚杆单元为 T3D2.计算模型边界条件除上部无约束作用垂直荷载外,其余各侧面和底面均为法向约束边界.模型计算时只考虑自重应力.计算模型网格划分见图 2 所示,围岩共划分 27 930 个单元,支护结构共划分 4 900 个单元.

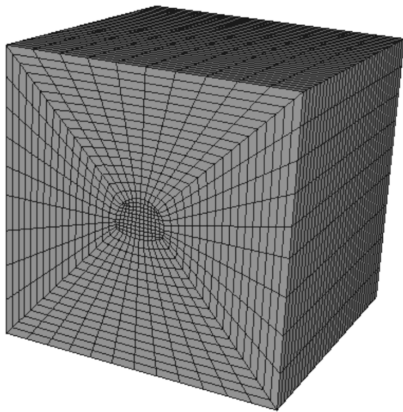


图 2 三维有限元计算模型网格划分
Fig. 2 The Meshing of three-dimensional finite element model

2.2 岩体物理力学参数的选取

开挖体的物理力学参数依据勘察设计院提供的取值.具体计算物理力学参数取值见表 1 ~ 表 2.

2.3 数值模拟计算及分析

在有限元分析过程中,采用生死单元来模拟控制隧道开挖和支护,为了真实反映隧道开挖及支护状况,每次开挖前,先对开挖部分土体地应力进行释放,然后进行开挖和初期支护,并在拱顶部位布设锚杆.在本算例中,通过使围岩弹性参数值

随场变量(温度)的减小而减小来模拟实现围岩应力释放过程,围岩初始应力、开挖土体应力释放(场变量)以及锚杆预应力在初始状态中定义.每个开挖段分为 2 个分析步:第 1 个分析步通过改变土体温度场变量来使土体应力释放;第 2 个分析步开挖土体,并施作喷层和锚杆.

表 1 隧道围岩计算力学参数
Table 1 Mechanics parameter of tunnel surrounding rock

岩体名称	深度/m	容重/(kN·m ⁻³)	弹模/MPa	泊松比	粘结力/MPa	内摩擦角/(°)
填筑土、碎石土	0~25	20.0	200	0.2	0.03	30
弱风化灰岩	25~150	27.2	12 000	0.32	2.42	40
风化千枚岩	150~500	25.5	4 200	0.28	0.80	32

表 2 支护结构计算力学参数
Table 2 Mechanics parameter of supporting structure

支护状态	材料	厚度(长度)/m	弹性模量/GPa	容重/(kN·m ⁻³)	泊松比
初期支护	喷混凝土	0.2	20	24	0.24
	锚杆	2.5	206	78	0.3
二次支护	钢筋混凝土	0.3	38	24.5	0.26

具体步骤如下:建立模型→平衡初始地应力→开挖断面(释放部分荷载)→喷射混凝土支护和安装锚杆→释放剩余应力

2.3.1 隧道开挖的空间效应分析

软岩隧道开挖之后,围岩由于受到初期支护

约束及横断面的“拱形”约束作用,距开挖面一定范围内的围岩表现出不同的应力和位移状态,即隧道的空间效应^[3].

经数值模拟计算,得拱顶竖向位移沿纵向和腰墙水平位移沿径向的空间效应曲线如图 3、图 4 所示.

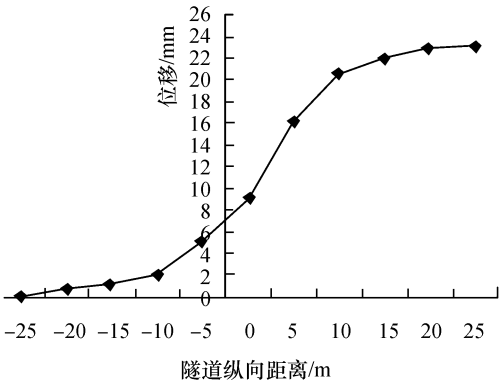


图 3 拱顶竖向位移沿隧道纵向空间效应曲线
Fig. 3 Space effect curve of the vault vertical displacement along tunnel longitudinal

由图 3 可以看出,开挖面周边围岩由于受到开挖面的空间约束作用,已开挖段距开挖面 2.0 倍洞径以内的围岩应力释放并没有瞬间完成,而

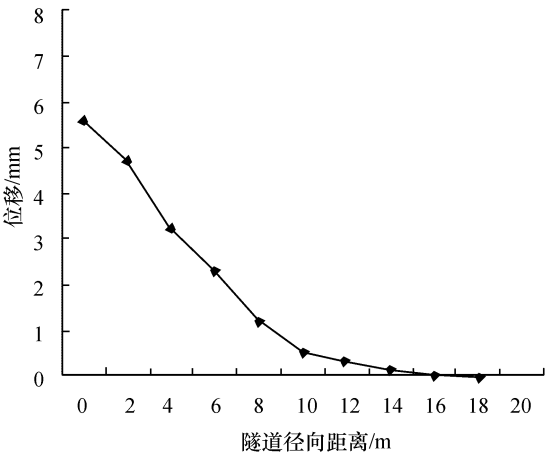


图 4 腰墙水平位移沿隧道径向空间效应曲线
Fig. 4 Space effect curve of the podium horizontal displacement along tunnel radial direction

是逐步释放,相应的围岩位移也是逐渐的增加.但由于隧道的开挖使得前方一定距离范围内的围岩受到扰动,使得未开挖段围岩在两倍洞径处还能

产生位移.从计算数据上看,开挖面上发生的拱顶竖向位移已约达总位移的三分之一,离开挖面 2.0 倍洞径处的位移才与最大径向位移量基本相等.从变形速率上看,未开挖段变形速率要大于开挖段的变形速率,并在开挖面处出现反弯点.由此可以看出,在高应力软岩隧道设计与施工过程中,要特别重视开挖面前方未开挖部分对开挖面的影响,防止未开挖部分扰动过大产生开挖面挤出坍方或整体失稳坍方等.

由图 4 可知,由于支护结构和横断面“拱形”约束作用,腰墙水平位移沿隧道径向位移相对较小,随着向围岩纵深发展,其值逐渐递减.从计算

数据上看,在约 1.0D 处衰减为 1 mm.可以认为腰墙水平位移沿隧道径向空间效应范围约为 1.0D.

2.3.2 隧道开挖的时间效应分析

软岩隧道开挖后由于空间效应的约束作用,其应力会逐步释放,位移逐步增加.随着开挖面的向前推进,开挖面空间效应逐渐消失,隧道边界因开挖引起的围岩荷载完全释放,岩体本身固有的流变时效逐渐显现并发展,而此时,围岩流变的粘性时效仍将持续存在,围岩应力与变形的后续释放主要由岩体流变产生^[4].

经数值模拟计算,得拱顶竖向位移沿纵向和腰墙位移沿径向的空间效应如图 5、图 6 所示.

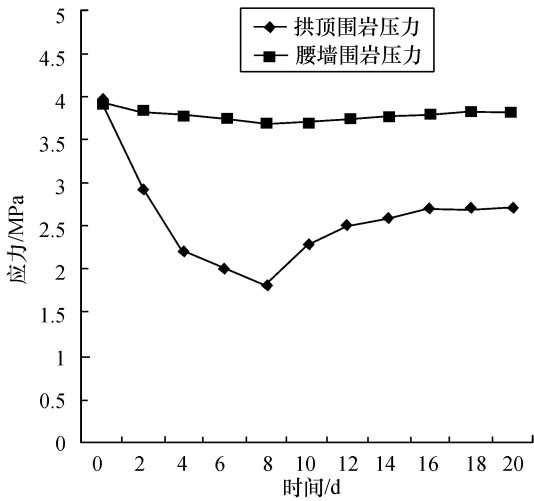


图 5 拱顶、腰墙围岩应力时间效应曲线

Fig. 5 Time effect curve of surrounding rock stress and of vault and podium

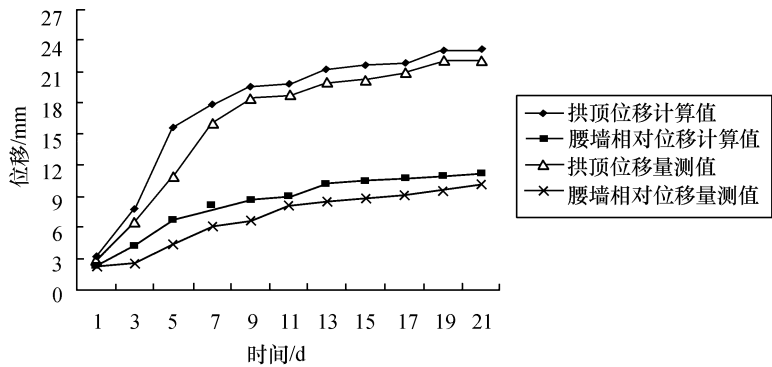


图 6 拱顶、腰墙围岩位移时间效应曲线

Fig. 6 Time effect curve of surrounding rock displacement vault of podium

从图 5 可以看出,高应力软岩隧道开挖后,拱顶的围岩压力先降后升,开挖后前 4 天围岩压力变化较为明显,减少了 45%;第 9 天围岩压力达

到最小值,约为 1.78 MPa.9 天以后围岩压力逐步上升,到第 15 天围岩压力趋于稳定.这主要是由于开挖初期围岩的应力释放导致了围岩压力减

少,而后初期支护发挥作用使得围岩压力减少趋于并支撑围岩,使得拱顶围岩三面受压,围岩压力增大,围岩进入调整阶段并趋于平缓.相对而言,腰墙围岩压力变化较小,主要是由于初期支护和横断面“拱形”约束作用限制了围岩的应力释放.因此在施工过程中特别应注意拱顶的围岩压力及围岩变形情况,以免发生事故.

由图6可知,数值模拟计算得出的位移值与实测值误差相差较小,但要略大于实测值,主要是由于岩体开挖后将产生弹性初始位移,而实际监控量测测点布置要滞后一段时间,因此测不到围岩弹性初始位移^[6].围岩拱顶及周边位移在前3天变化较大,达到总位移的70%,此后变化值逐渐减小,在15天左右趋于稳定(隧道周边水平收敛速度小于0.2 mm/d;拱顶或底板垂直位移速度小于0.1 mm/d),在变形及其速率持续增长条件下,此时若不及时支护,软岩由于流变时效产生过大变形,围岩进入粘塑性(时效屈服)状态,将导致围岩垮落、坍塌和失稳.因此根据我国现行规范及经验,可在15天左右施加二次支护,这与实际施工过程中施加二次支护时间相近,验证了模型的准确性,可用于指导高应力软岩隧道设计与施工.

3 结 论

利用有限元软件 ABAQUS 对某高应力软岩隧道左线 ZK105 + 860 至 ZK105 + 920 段开挖情况进行了三维时空效应分析,并与实测结果进行了比较.主要结论有:

1) 软岩隧道围岩稳定受隧道的“空间效应”及“时间效应”的影响,“空间效应”由横断面的横

断面“拱形”约束作用以及开挖面的约束作用而引起;而“时间效应”主要由软岩固有的流变的时效特性.

2) 从“空间效应”分析结果可以得出,该隧道深埋段纵向空间约束范围约为 2.0D,横向空间约束范围约为 1.0D,在该空间范围内,要重视围岩位移和压力变化规律,加强量测,保证施工安全.

3) 从“时间效应”进行分析可以看出,该隧道深埋段拱顶应力变化较大,位移数值计算结果与量测结果较为相近,验证了模型的准确性.同时根据施作标准判断出的二次支护时间与实际情况相吻合,因此计算结果可作为选择施工方案的依据和指导施工.

参考文献:

- [1] 赵旭峰,王春苗,孔祥利.深部软岩隧道施工性态时空效应分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):404-409.
- [2] 何满潮,景海河,孙小明.软岩工程力学[M].北京:北京科学出版社,2002.
- [3] 温玉忠.软岩支护系统研究[J].煤炭技术,2007,26(4):79-91.
- [4] 汪小敏,黄宏伟,谢雄耀.软弱围岩隧道施工三维有限元分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(6):1114-1118.
- [5] 谭代明,漆泰岳,莫阳春.考虑时空效应的软弱围岩隧道施工稳定性研究[J].水文地质工程地质,2009,36(4):85-89.
- [6] Cai M. Influence of stress path on tunnel excavation response-numerical tool selection and modeling strategy [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(6):618-628.