

# 通渝隧道进口施工动态开挖过程的数值模拟研究

张鹏勇 徐林生

杨 君

(重庆交通学院桥梁隧道及结构工程系, 重庆 400074) (重庆市公路局, 重庆 400067)

**【摘 要】** 根据通渝公路隧道进口偏压段台阶分部法施工的特点, 采用有限元方法对其动态开挖过程进行数值模拟分析, 以指导隧道信息化施工实践。

**【关键词】** 通渝隧道; 台阶分部开挖方; 有限元仿真数值模拟

**【中国分类号】** TU 457

## Numerical Simulation of Dynamic Excavation Construction Process of Tongyu Tunnel Entrance

**【Abstract】** According to the character of step branch excavating in the Tongyu tunnel entrance construction, the dynamic excavation simulation of construction process has been conducted with FEM methods, feedback controlling design is realized and the construction is controlled.

**【Key words】** Tongyu tunnel; step branch excavating method; FEM numerical simulation

### 1 概 述

通渝隧道全长 4 279 m, 最大埋深达 1 000 余米, 属单洞双向行驶的深埋特长隧道。隧道进口偏压段基岩主要为志留系中统纱帽组, 岩性以灰绿色砂质页岩、泥岩为主, 夹粉砂岩, 层理发育, 层间结合较差, 围岩类别为Ⅲ类; 其设计断面见图 1。

我们选定 K19+615 典型断面, 对其动态施工过程进行仿真数值模拟研究, 以探讨其开挖过程的动态施工力学行为及隧道围岩的应力变化过程, 为隧道信息化施工提供科学依据和技术指导。

### 2 隧道施工过程的动态仿真数值模拟研究

#### 2.1 基本原理<sup>[1,2]</sup>

隧道开挖过程包括围岩分步(部)开挖及支护结构的分部设置等, 用以模拟不同施工阶段力学性态的有限元方程为:

$$([K_0] + [\Delta K_i]) \{\Delta \delta_i\} = \{\Delta F_{ir}\} + \{\Delta F_{ia}\} \quad (1)$$

$\{i=1, M\}$

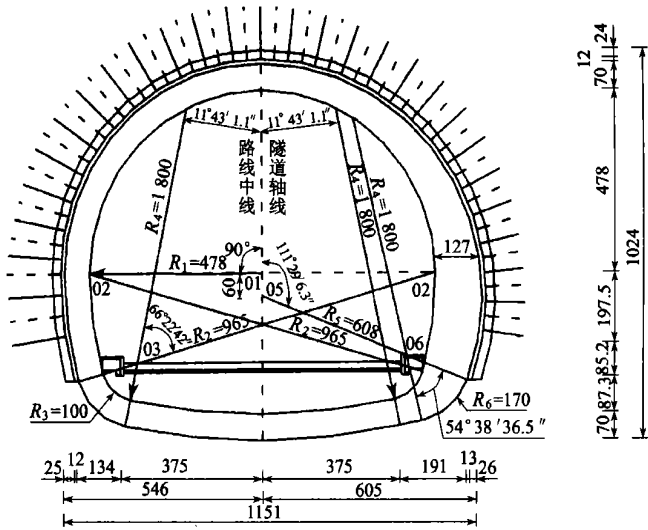
式中:  $M$  为施工阶段总数,  $[K_0]$  为开挖前岩体初始总刚度矩阵;  $[\Delta K_i]$  为施工过程中岩体和支护结构刚度的增量或减量, 其值为挖去岩体单元及设置或拆除支护结构单元的刚度;  $\{\Delta F_{ir}\}$  为由开挖释放产生的边界增量结点力列阵, 初次开挖由岩体自重、地下水荷载、地面超载等确定, 各开挖步由当前应力状态决定;  $\{\Delta F_{ia}\}$  为施工过程增加的结点荷载列阵;  $\{\Delta \delta_i\}$  为任一施工阶段产生的结点增量位移列阵。

任一施工阶段  $i$  的位移  $\{\delta_i\}$ 、应变  $\{\epsilon_i\}$  和应力  $\{\sigma_i\}$  为:

$$\{\delta_i\} = \sum_{j=1}^i \{\Delta \delta_j\}, \quad \{\epsilon_i\} = \sum_{j=1}^i \{\Delta \epsilon_j\},$$
$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_0\} + \sum_{j=1}^i \{\Delta \sigma_j\} \quad (2)$$

式中:  $\{\sigma_0\}$  为初始应力,  $\{\Delta \sigma_j\}$  为各施工阶段的增量应力。

材料为弹塑性体时, 计算可采用增量初应力法。在施工过程的动态仿真数值模拟分析



初期支护、衬砌参数:  $\phi 22$  药包锚杆  $L=350$  cm、 $\textcircled{80} \times 80$  cm; 喷 C20 砼 24 cm;  
 钢筋网  $\phi 6.5$ 、 $\textcircled{20} \times 20$ ; I20b 型钢  $\textcircled{50}$  cm; 二次衬砌砼 70 cm

图 1 通渝隧道进口偏压段复合式衬砌设计断面图(单位:cm)

中,以不同的开挖阶段(同一开挖阶段也可包括若干施工亚阶段)来进行模拟的;分部卸载由开挖面向前推进而引起,计算时可依据经验或由现场量测位移分别在同一开挖阶段选取不同的地应力释放系数<sup>[3,4]</sup>,据以反映不同施工阶段的变化;分步支护,如初期支护(喷砼、型钢支撑等)、二次衬砌永久支护计算时分别采用在不同的施工阶段设置来模拟。软弱围岩中,复合式衬砌中的初期支护和二次衬砌一般要共同承担荷载;结构荷载计算的有限元模型中,按有关规程设定各台阶开挖后围岩和喷锚初期支护各承担围岩压力 40% 后,剩下的 20% 围岩压力最终由二次衬砌砼来承担。

### 2.2 计算模型和计算参数

本文利用同济大学研制成功的具有模拟分步开挖和支护能力的同济曙光岩土及地下

工程设计与施工分析商业软件 V2.4 版进行模拟分析,计算时选用了弹塑性物理模型和 Drucker-Prager 屈服准则。据进口端偏压加强段 K19+615 处的地质原型,建立有限元模拟计算模型,其隧道顶部埋深为 25 m;初始状态模型中,上表面左高右低,按平均坡角 36° 设置,定为自由面;模型底边距隧道底部约 20 m,约束垂直方向位移;模型左右侧距隧道边墙分别为 3 倍洞跨,均约束水平方向的位移。岩体材料采用各向同性体,锚杆和喷层采用杆单元,工字钢和二次衬砌均采用直梁单元。利用 V2.4 版软件提供的分步开挖和支护功能,对其动态施工过程进行仿真数值模拟。实际分析时,则将初期支护中的钢筋网、纵向联接筋等对喷射砼力学性质的贡献都作为安全储备,不予考虑。有限元计算中的介质参数见表 1。

表 1 有限元计算采用的介质参数表

| 项 目       | 主 要 相 关 参 数   |
|-----------|---|
| Ⅲ类围岩      | $\gamma=0.024 \text{ MN/m}^3$ , $E=3 \ 500 \text{ MPa}$ , $\mu=0.35$ , $C=0.8 \text{ MPa}$ , $\varphi=32^\circ$ , $R_1=1.0 \text{ MPa}$ , $K_0=0.54$                  |
| 锚杆        | $\gamma=0.078 \ 5 \text{ MN/m}^3$ , $E=200 \ 000 \text{ MPa}$ , $A=0.000 \ 38 \text{ m}^2$  |
| I 20b 工字钢 | $\gamma=0.078 \ 5 \text{ MN/m}^3$ , $E=210 \ 000 \text{ MPa}$ , $I=2.502 \ e-5 \text{ m}^4$ , $A=0.003 \ 955 \text{ m}^2$   |
| C20 喷砼层   | $\gamma=0.023 \text{ MN/m}^3$ , $E=26 \ 000 \text{ MPa}$ , $A=0.04 \text{ m}^2$   |
| C25 二次衬砌砼 | $\gamma=0.023 \text{ MN/m}^3$ , $E=28 \ 500 \text{ MPa}$ , $I_1=0.028 \ 58 \text{ m}^4$ , $I_2=0.083 \ 3 \text{ m}^4$ , $A_1=0.7 \text{ m}^2$ , $A_2=1.0 \text{ m}^2$ |

通渝隧道开挖采用上弧形导坑的台阶分部法,计算中把整个施工过程分为8步加以模拟分析:第0步(初始状态)→第1步(上弧形导坑开挖)→第2步(对上弧形导坑开挖部分进行喷锚支护)→第3步(开挖上台阶核心部分)→第4步(开挖下台阶的核心部分)→第5步(开挖下台阶两边)→第6步(对下台阶的开

挖部分进行喷锚支护)→第7步(开挖仰拱部分)→第8步(施工全断面二次衬砌混凝土)。

初始状况(第0步)计算模型单元数为4 687个、节点数4 460个,最终状态(第8步)计算模型单元数为3 661个、节点数3 501个。部分开挖步下的有限元网格局部放大图见图2。

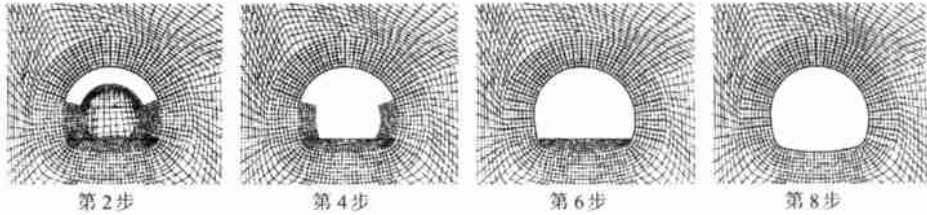


图2 部分开挖步下的有限元计算网格局部放大图

### 2.3 计算结果和分析

有限元动态仿真数值模拟计算内容包括:施工各阶段的围岩应力场、位移场、屈服区和支护衬砌结构内力等。经综合分析,成果如下:

1)近坡面附近,各施工阶段的主应力等值线均近于平行坡面,应力量级总体较低;随着埋深的增加及各施工阶段分步开挖的进行,洞室周围围岩的应力分异作用较为明显,拱顶及仰拱中部围岩主应力均明显减小,顶部少部分围岩 $\sigma_3$ 则出现拉应力;隧道两边拱腰处围岩主应力则有明显增大,形成较高应力承载区;两边拱肩及左侧拱脚处围岩应力有所增大,右侧拱脚处围岩应力变化不大。

2)当二次衬砌施作完成之后,从最终状态下(第8步)主应力等值线图可以看出,隧道拱腰处应力集中现象最为明显,其次为拱肩处(见图3);最大主应力 $\sigma_1$ 出现在左侧拱腰部位围岩中,但应力集中系数最大值却出现在右侧拱腰部位围岩中(其值达2.69)。洞周各特征点的围岩应力集中系数见表2。

3)受地表坡度及埋深条件的影响,隧道分步(部)开挖施工过程中,洞室周边存在着较为明显的偏压现象:总体而言,由于洞室左侧埋深大于右侧,因而洞室左侧周围围岩的最大主

应力 $\sigma_1$ 值均大于右侧相应位置的围岩最大主应力 $\sigma_1$ 值(见图3、图4)。

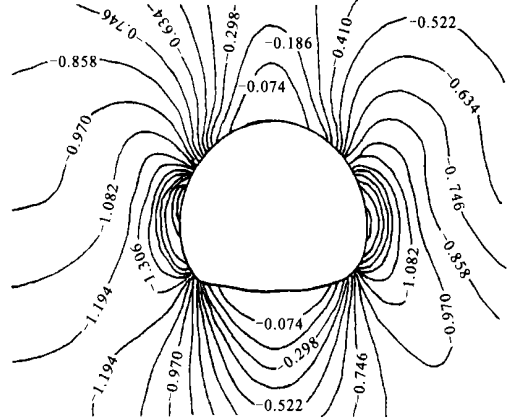


图3 最终状态(第8步)围岩最大主应力 $\sigma_1$ 等值线图(MPa)

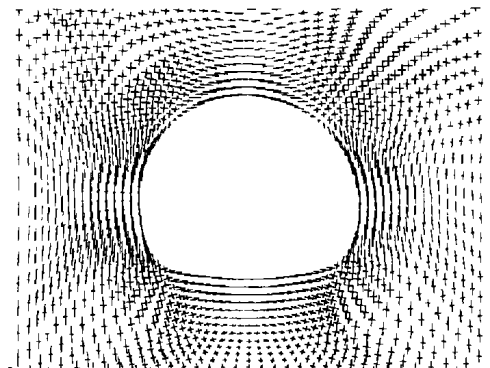


图4 最终状态(第8步)围岩主应力矢量图

表2 最终状态(第8步)下洞周各特征点围岩应力集中系数

| 位置      | 最终状态下的最大主应力<br>$\sigma_1/\text{MPa}$ | 初始状态下的最大主应力<br>$\sigma_1'/\text{MPa}$ | 应力集中数<br>$\sigma_1/\sigma_1'$ |
|---------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 左侧拱脚处围岩 | -1.135                               | -0.921                                | 1.23                          |
| 左侧拱腰处围岩 | -2.144                               | -0.848                                | 2.53                          |
| 左侧拱肩处围岩 | -0.885                               | -0.767                                | 1.15                          |
| 拱顶处围岩   | -0.022                               | -0.666                                | 0.03                          |
| 右侧拱肩处围岩 | -0.782                               | -0.656                                | 1.19                          |
| 右侧拱腰处围岩 | -1.897                               | -0.705                                | 2.69                          |
| 右侧拱脚处围岩 | -0.806                               | -0.808                                | 0.99                          |
| 仰拱中部处围岩 | 0.010                                | -0.885                                | 0.01                          |

注:负号为压应力

4)在分部开挖施工过程中,隧道周边围岩均产生向洞内收敛的位移,致使洞室断面缩小。从最终状态(第8步)下洞室周边围岩各特征点处的位移值分析可知(见表3):隧道拱顶处围岩最终累积下沉量的2.135 mm,仰拱中部处围岩最终累积底鼓量达2.248 mm,隧

道围岩的水平收敛值在拱腰处最大,其值为2.445 mm;隧道两边拱脚及拱肩处围岩铅垂方向的累积位移值( $U_y$ )要大于其水平方向的累积位移值( $U_x$ ),而其拱腰部位围岩水平方向的累积位移( $U_x$ ),则大于其铅垂方向的累积位移值( $U_y$ )。

表3 最终状态(第8步)下洞周某些围岩特征点的累积位移表

| 累积位移值           | 底部仰拱中部 | 洞室左侧  |       |       | 拱顶    | 洞室右侧  |       |       |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |        | 拱脚    | 拱腰    | 拱肩    |       | 拱肩    | 拱腰    | 拱脚    |
| $U_x/\text{mm}$ | 0.121  | 0.538 | 1.075 | 0.779 | 0.158 | 1.119 | 1.370 | 0.746 |
| $U_y/\text{mm}$ | 2.248  | 0.939 | 0.138 | 1.413 | 2.135 | 1.296 | 0.177 | 0.977 |

5)开挖卸载后,洞室表层岩体应力出现松弛,弹性承载区分布于深浅不等的内部岩体中,塑性区主要集中在拱顶及拱脚两侧的围岩处,并沿开挖轮廓呈X型斜向延伸(见图5)。

延伸最大深度为10 m左右。

6)计算所得的二次衬砌内力对于隧道设计、施工总体而言也是很安全、稳妥的。(见图6~8)。

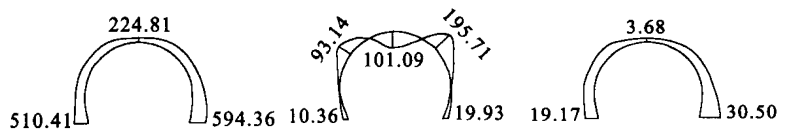
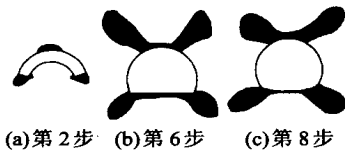


图5 不同开挖施工阶段围岩塑性屈服区分布示意图

图6 最终状态下二次衬砌轴力图(单位:kN)

图7 最终状态下二次衬砌弯矩图(单位:kN·m)

图8 最终状态下二次衬砌安全系数图

### 3 结论

对通渝隧道进口偏压段动态开挖过程的数值模拟研究,侧重探讨的是其施工过程中围岩变形破坏的总体规律性,其主要计算成果与本课题组施工现场监控量测所得结果基本吻合,因而可以指导隧道信息化施工实践。

### 参考文献

1 孙钧. 地下工程设计理论与实践. 上海:上海科学技术出版社,1996. 121~133

2 朱合华,丁文其. 地下结构施工过程的动态仿真模拟分析. 岩石力学与工程学报. 1999, 18(5): 558~562

3 朱合华,丁文其,李晓军等. 盾构隧道施工过程模拟分析. 岩石力学与工程学报. 1998, 18(增): 860~864

4 徐林生,孙钧,蒋树屏. 洋碰隧道CRD工法施工过程的动态仿真数值模拟研究. 地质灾害与环境保护. 2001, 12(1): 58~62