

岩体圆形洞室锚杆前后应力位移分析^{*}

吴继敏 高正夏 侯玉宾

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 探讨岩体内圆形洞室锚杆支护前后的应力、位移解析解的变化 ,即围岩特征曲线 .结合 Labiouse 等的系列文章及其他有关资料 ,应用位移边界理论、Lamé 公式及弹塑性理论 ,编制了 TURBO Pascal 及 Excel 计算程序 ,评价洞室围岩的应力位移特征 .与 Labiouse 的结果比较 ,应用本文的计算过程得到的结果极为理想 .

关键词 洞室 ;锚杆 ;应力 ;位移 ;破裂半径

中图分类号 TU452

对岩体内圆形洞室锚杆支护前后的应力、位移进行解析分析 ,必须满足以下基本假定 (a)轴对称条件 .半径为 r_i 的圆型洞室 ,围岩是均质各向同性的 .(b)岩体力学特性 .仅考虑弹塑性特征并符合摩尔强度准则 ,即可以应用非关联流规则进行破坏后的应变计算^[1] :

$$\Delta \epsilon_3^p + \alpha \Delta \epsilon_1^p = 0$$

式中 : α ——膨胀参数 ; $\Delta \epsilon_3^p$ 、 $\Delta \epsilon_1^p$ ——最小和最大主应变的增量(这里分别为切向和径向应变 ϵ_t 和 ϵ_r).(c)锚杆系统 .锚杆施工无喷浆支护 ,带螺栓 .锚杆在洞壁呈放射状布置并与洞壁垂直 ,且在纵向或横向间距相等 .

在计算过程中 ,应用到的参数包括三个方面 :

- a. 弹塑性岩体特征参数 : E 为杨氏模量(kPa) , ν 为泊松比 , φ 为内摩擦角(°) , c 为凝聚力(kPa) , P_0 为岩体初始现场应力(kPa) .
- b. 锚杆系统特征参数 : E_b 为杨氏模量(kPa) , ϕ_b 为直径(m) , L_b 为长度(m) , T_{b0} 为锚杆施工时施加的预应力(kN) , T_b 为由于锚杆系统的变化 ,引起 T_{b0} 的变化的量(kN) , S_t , S_l 分别为洞壁轴线方向横截面和纵剖面上的间距(m) , P_i 为假设的洞壁内支撑压力(kPa) , r_e 为承载圈半径 ,即洞室半径锚杆自由长度之和(m) , r_{pei} 为掌子面掘进至一定深度安装锚杆时 ,岩体破裂圈的半径(m) , r_{pe} 为假设洞室开挖结束 ,无支护情况下的最大破裂圈半径(m) , P_{lim} 为假设洞室开挖结束 ,无支护情况下 ,抵消产生岩体破裂所需的洞壁极限压力(kPa) , P_{p0} 为由于锚杆预应力引起的洞壁内支撑压力(kPa) , P_p 为锚杆施工后 ,由于应力位移的变化引起的锚杆支撑压力(kPa) .
- c. 应力位移参数 : σ_r 为围岩径向应力(kPa) , σ_t 为围岩切向应力(kPa) , u_r 为围岩径向位移(m) , u_t 为围岩切向位移(m) .

1 分析原理

1.1 弹性状况

据位移边界理论(convergence-confinements)^[1]给定的分析解 ,洞室围岩要维持弹性特征所需的压力 P_{lim} ,

$$P_{lim} = \frac{\lambda P_0 + c \cot \varphi}{\lambda + 1} - c \cot \varphi$$

其中 $\lambda = \tan^2 [(\pi / 4) + (\varphi / 2)]$

此时 ,洞壁及围岩内任一点(r 处)的应力及径向位移由下式表示 :

收稿日期 :1998-06-03

第一作者简介 :吴继敏 ,男 ,教授 ,地质工程专业 ,主要从事图像分析的地质应用、地质稳定性评价及其概率分析、模型等方面的研究 .

^{*} 国家教委留学回国人员科研启动基金资助项目的部分研究成果 .

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= P_0 - (P_0 - P_i) \frac{r_i^2}{r^2} \\ \sigma_t &= P_0 + (P_0 + P_i) \frac{r_i^2}{r^2} \end{aligned} \right\} \quad (P_i \leqslant P_{\text{lim}})$$
$$u_r = \frac{1+\nu}{E} (P_0 - P_i) \frac{r_i^2}{r}$$

1.2 弹塑性状况

假设洞室掘进没有支护,即 $P_i = 0$,此时的最大破裂圈半径

$$r_{pe} = r_i \left[\frac{\lambda P_0 + c \cot \varphi}{c \cot \varphi (\lambda + 1)} \right]^{1/(\lambda - 1)}$$

而在洞室开挖锚杆时,由于距离效应,洞壁的内支撑压力还没有完全消失,围岩产生的破裂圈半径 r_{pei} 小于 r_{pe} ,有

$$P_i = \frac{\lambda P_0 + c \cot \varphi}{(\lambda + 1) e^{(\lambda - 1) \ln(r_{pei}/r_i)} - c \cos \varphi}$$

在这样的情况下,洞壁及围岩内任一点(r 处)的应力及径向位移需分两步计算.

a. 塑性圈(破裂圈)内($r_i \leqslant r \leqslant r_{pei}$):

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (P_i + c \cot \varphi) \left(r/r_i \right)^{\lambda - 1} - c \cot \varphi \\ \sigma_t &= \lambda (P_i + c \cot \varphi) \left(r/r_i \right)^{\lambda - 1} - c \cot \varphi \\ u_r &= \frac{(1 + \nu)(\lambda - 1)}{E(\lambda + 1)} (P_0 + c \cot \varphi) r \left\{ 1 + \frac{2}{\lambda + 1} \left[\left(\frac{r_{pei}}{r} \right)^{\lambda + 1} - 1 \right] \right\} \end{aligned}$$

b. 破裂圈以外的弹性区($r_{pei} \leqslant r \leqslant \infty$):

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P_0 - \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right) (P_0 + c \cot \varphi) \left(\frac{r_{pei}}{r} \right)^2 \\ \sigma_t &= P_0 + \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right) (P_0 + c \cot \varphi) \left(\frac{r_{pei}}{r} \right)^2 \\ u_r &= \frac{(1 + \nu)(\lambda - 1)}{E(\lambda + 1)} (P_0 + c \cot \varphi) \left(\frac{r_{pei}}{r} \right)^2 \end{aligned}$$

1.3 锚杆系统

在岩体内的锚杆,洞壁端用螺栓固定,另一端用水泥浆或树脂固定,中间段为锚杆的自由长度,与围岩无摩擦.锚杆的预应力(P_{p0})必然在锚杆的另一端(r_e 处)产生反作用力($P_p = P_{p0}(r_i/r_e)$).由于洞室继续掘进,锚杆系统应力、位移发生变化,此时,承载圈内($r_i \leqslant r \leqslant r_e$)变化后的应力、位移可以由 Lamé 公式计算^[2]:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P_p \frac{r_i}{r_e + r_i} \left(1 + \frac{r_i r_e}{r^2} \right) & \sigma_t &= P_p \frac{r_i}{r_e + r_i} \left(1 - \frac{r_i r_e}{r^2} \right) \\ u_r &= \frac{1 + \nu}{E} P_p \frac{r_i r}{r_e + r_i} \left(1 - 2\nu - \frac{r_i r_e}{r^2} \right) \end{aligned}$$

而锚杆安装后,掘进重新开始,使得锚杆处的洞壁内应力 P_i 逐渐降低,围岩内破裂圈扩展,导致洞壁处的位移增加,锚杆受拉产生增量^[3]:

$$\Delta L_b = (u_{ri} - u_{ri, P_{p0}}) - (u_{re} - u_{re, P_{p0}})$$

式中: $u_{ri, P_{p0}}$ 、 $u_{re, P_{p0}}$ ——锚杆预应力后产生的位移; u_{re} ——锚杆后 r_e 处的位移.

长度增量 ΔL_b 产生的回弹张力

$$T_b = T_{b0} + \Delta T_b = T_{b0} + \frac{\Delta L_b E_b A_b}{L_b}$$

式中: A_b ——锚杆的横截面积, mm^2 .

结果,锚杆洞壁内应力 P_p 和承载圈外应力 P_{p0} 共同作用在承载圈上,

$$P_p = P_{p0} + \Delta P_p = \frac{T_{b0} + \Delta T_b}{S_p S_t}$$

1.4 综合系统

锚杆安装后 ,洞室继续掘进 ,洞壁及围岩应力位移 ,即综合应力及径向位移 ,可以认为是洞室掘进时 ,残存的应力位移和锚杆引起的应力位移之矢量叠加^[2]。例如 ,一方面由于锚杆施工前 ,洞壁残存的内压力 P_i 没有完全解除 ,继续掘进 ,内压力逐渐降低 ,引起围岩中应力位移的变化。另一方面 ,由于内压力逐渐降低 ,洞壁位移增加 ,锚杆受拉变形 ,又使洞壁处锚杆的径向应力增加。当内压力 P_i 降为零时 ,由于 r_{pei} 增加 ,洞壁围岩的径向应力降至等于锚杆受拉应力增加的最终值 ,洞室围岩及锚杆系统的应力位移处于平衡状态^[4]。

2 计算实例

这里提供两个计算实例来说明圆形洞室围岩锚杆施工前后的应力位移特征及计算过程。表 1 给出了实例的参数。

表 1 计算实例的参数
Table 1 Parameters for calculation cases

实例	E	ν	φ	c	P_0	α	E_b	ϕ_b	L_b	S_t	S_l	r_i
1	10^6	0.3	34	750	10^4	1.2	8×10^7	0.025	6	0.75	0.75	5
2	2×10^6	0.3	28	300	5×10^4	2.4	5×10^7	0.020	2	1	1	4

实例 1 中 ,预应力 T_{b0} 为 50 kN ,距掌子面 1 m 安装预应力锚杆 ,由于该处还残存部分内压力 P_i ,在此压力作用下 ,产生的破裂圈半径 r_{pei} 为 6.20 m。实例 2 中 ,锚杆的安装部位洞壁径向位移有 0.036 4 m ,锚杆距掌子面具有一定距离 ,且洞壁处还残存部分内压力 P_i 。

2.1 实例 1

a. 首先假定洞室开挖完成 ,无支护情况下 ,维持围岩内不产生破裂圈所需的假想洞壁极限内压力 P_{lim} 为 3 786.31 kPa。在此应力作用下 ,围岩处在弹性状态 ,即最大切向应力为 16 213.69 kPa ,相应的径向位移为 0.040 4 m。

b. 假定洞室开挖结束 ,无支护情况下 ,即洞壁的内压力为零。此时 ,围岩内产生破裂圈 ,半径为 8.97 m。几组特征值见表 2。

c. 预应力锚杆所起的作用 ,即 50 kN 的预应力 ,相当于洞壁处的径向应力为 88.89 kPa。距掌子面 1 m 安装预应力锚杆 ,此时对应的破裂圈半径为 6.20 m ,相当于洞壁处存在一个假想的内应力为 1 726.11 kPa ,对应的径向位移(r_i 处)为 0.062 6 m。在 r_e 处 , σ_r 等于 8 026.00 kPa ,径向位移为 0.028 2 m。在 r_i 处 ,预应力的增加 ,在原应力状态条件下 ,相当于增加一个反向的径向应力 88.89 kPa 及反向的径向位移 0.000 33 m。在 r_e 处(承载圈的另一端) ,锚杆的预应力相当于增加一个同向的径向应力 40.40 kPa 及同向的径向位移 0.000 02 m。

d. 预应力锚杆安装后继续掘进 ,洞壁处的内应力 P_i 减小 ,位移增加 ,锚杆拉长 ,其作用力 P_p 也迅速增加 ,原应力状态下的径向应力 σ_r 则迅速降低。计算结果见表 3。

表 2 $P_i = 0$ 时围岩中几组应力位移特征值
Table 2 Characteristic values of stress and displacement in rock openings for $P_i = 0$

r	σ_r	σ_t	u_r
5.0	0.00	2 821.07	0.136 5
9.0	3 828.11	16 361.55	0.072 2
11.0	5 868.19	14 131.18	0.059 1
12.0	6 528.14	13 471.86	0.054 2

表 3 锚杆前后围岩内的应力位移特征值

Table 3 Characteristic values of stress and displacement in rock openings by bolts						
$\sigma_r(r_e)$	r_{pei}	$u(r_e)$	$\sigma(r)$	$u(r_i)$	$P(r_i)$	P_i
8 066.40	6.20	0.028 2	1 815.00	0.026 3	88.89	1 726.11
7 330.66	7.21	0.038 2	823.45	0.085 8	246.70	576.75
6 795.25	7.90	0.045 8	422.89	0.104 1	370.48	52.41
6 732.06	7.98	0.046 7	385.34	0.106 3	385.34	0.00

2.2 实例 2

- a. 假定洞室无支护开挖结束 ,维持岩体弹性状态所需的 P_{lim} 为 2 387. 77 kPa ,洞壁相应的径向位移为 0. 006 8 m.
- b. 假定洞室无支护开挖结束 ,此时洞壁的最大径向位移为 0. 098 8 m ,相应的破裂圈半径为 10. 19 m (Lamé 给出的结果为 10. 19 m) ,径向应力为零 ,切向应力为 998. 56 kPa.
- c. 实际洞室锚杆支护时 ,洞壁的径向位移为 0. 036 4 m ,据此 ,可以得到假想的洞壁内压力 P_i 为 438. 90 kPa ,相应的破裂圈半径为 7. 36 m.
- d. 锚杆安装后 ,围岩及锚杆在洞室继续掘进的情况下 ,应力位移变化的几组特征值见表 4.

表 4 锚杆前后围岩内的应力位移特征值

Table 4 Characteristic values of stress and displacement in rock openings by bolts

$\sigma_r(r_e)$	r_{pei}	$u_r(r_e)$	$\sigma_r(r)$	$u_r(r_i)$	$P_p(r_i)$	P_i
1 419. 16	7. 36	0. 016 2	438. 90	0. 034 6	0. 00	438. 90
967. 58	8. 69	0. 025 3	183. 18	0. 058 7	117. 99	65. 19
895. 38	8. 93	0. 027 4	147. 95	0. 064 2	144. 55	3. 41
891. 53	8. 95	0. 027 5	146. 07	0. 064 5	146. 07	0. 00

3 结 语

按照位移边界理论及弹塑性理论等 ,对岩体内地下圆形洞室锚杆支护前后的应力、位移进行特征分析 ,评价洞室开挖过程中的稳定性 ,在理论上是比较严格的 ,所得的结果也是可以接受的 . 然而 ,洞室围岩是一个复杂的地质体 ,必须在计算过程中考虑其结构面的存在 ,使得围岩的稳定性评价更具实际意义 .

参 考 文 献

1 Labiouse V. Etude analytique et numériques du boulonnage à ancrage ponctuel comme soutènement de tunnels profonds creusée dans la roche. Doctoral Thèse Université Catholique de Louvain. Louvain-la-Neuve ,1993. 53 ~ 88

2 Holmberg M. The mechanical behaviour of untensioned grouted rockbolts. Doctoral Thesis of Dept. of Soil and Rock Mechanics. Stockholm : Royal Institute of Technology ,1991. 105 ~ 132

3 Labiouse V. Ground response curves for rock excavations supported by ungrouted tensioned rockbolts. Rock Mechcanics and Rock Eng , 1996 29(1) :19 ~ 38

4 Hoek E ,Brown E T. Underground excavation in rock. London :The Institution of Mining and Metallurgy ,1980. 81 ~ 96

Ground Response Curves for Circular Rock Openings Supported by Rockbolts

Wu Jimin Gao Zhengxia Hou Yubin

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Abstract Analysis of ground response curves for circular rock openings supported by rockbolts is proposed. By means of Lamé 's formula and the elastic-plastic theory and with reference to a series of Labiouse 's articles and other documents the calculating programs on TURBO Pascal and Excel are developed and the characteristics of stress and displacement of circular rock openings are analysed. The results obtained in this paper are more satisfactory than Labiouse 's.

Key words openings ;bolting ;stress ;displacement ;broken radius