

新七道梁隧道量测位移反分析及工程应用

李德武¹, 韩文峰², 景 韧³

(1. 兰州交通大学 兰州市 730070; 2. 兰州大学 兰州市 730000; 3. 甘肃省交通规划设计院 兰州市 730030)

摘 要: 以新七道梁隧道为工程背景, 采用平面应变边界元 BMP90 程序, 将围岩简化成等效连续均质各向同性的线弹性介质, 将喷锚支护提供的支护抗力看成边界元上的分布力, 根据收敛值和拱顶下沉值推求等效弹性模量和侧压力系数。然后利用反分析得出结果, 对围岩的应力与变形进行了分析。

关键词: 隧道; 位移反分析; 边界元

1 喷锚支护所提供的最大支护抗力的计算

20 世纪 60 年代, 奥地利的腊布塞维奇教授, 首先提出了剪切滑移破坏理论, 指出锚喷柔性支护破坏形态主要是剪切破坏而不是挠曲破坏, 且在剪切破坏前没有出现挠曲开裂。此理论被奥地利学者塞特勒的模型试验所证实。

剪切滑移破坏理论认为: 在岩体中开挖一坑道, 若坑道周边的垂直压力大于水平侧向压力时, 在水平直径的两侧形成压应力集中而产生剪切滑移面^[1~3]。随着剪切滑移面的扩展, 则在坑道水平直径两端形成 2 个剪切楔形滑移块体。在无支护情况下, 两剪切楔形滑移块体由于剪切面与围岩体分离, 向坑道内移动。之后, 上下部分围岩体由于楔形块体滑移失去支撑力, 产生挠曲破坏而坍塌。最终会形成一个暂时稳定的垂直椭圆形洞室。

为了阻止剪切滑移体向坑道内滑移, 需要修筑喷锚柔性支护, 使喷锚支护所提供的支护抗力与剪切滑移体的滑移力相平衡, 以稳定坑道。

喷锚支护由锚杆、钢支撑、喷混凝土等组成。该联合支护的总支护抗力可视为各支护抗力之和, 即:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (1)$$

式中: P 为喷锚联合支护所提供的总支护抗力; P_1 为喷混凝土提供的支护抗力; P_2 为钢筋网提供的支护抗力; P_3 为锚杆提供的支护抗力; P_4 为钢拱架提供的支护抗力。

计算所得的 P 值应大于阻止剪切滑移所需要的最小支护抗力值, 即 $P > P_{\min}$ 。

(1) 喷混凝土提供的支护抗力 P_1 。

$$P_1 = \frac{2\tau_s d_s}{b \sin \alpha_s} \cos \psi \quad (2)$$

式中: d_s 为喷混凝土层厚度; τ_s 为喷混凝土抗剪强度, 取 $\tau_s = 0.2\sigma_c$ (σ_c 为喷混凝土的抗压强度); α_s 为喷混凝土的剪切角, 取 $\alpha_s = 30^\circ$; ψ 为喷层剪切滑移面的平均水平倾角, $\psi = \alpha - \alpha_s$, $\alpha = \pi/4 - \varphi/2$, φ 为岩体的内摩擦角; b 为剪切区的高度。

(2) 钢筋网提供的支护抗力 P_2 。

计算时可换算成相应的喷混凝土支护抗力, 即:

$$P_2 = \frac{2F_w \tau_w}{A b \sin \alpha_i} \cos \psi \quad (3)$$

式中: F_w 为 1 根横向钢筋的面积; τ_w 为钢材的抗剪强度, 一般取 $\tau_w = \sigma_t/2$ (σ_t 为钢材的允许抗拉强度), 也可用 $\tau_w = 15\tau_s$; A 为钢筋网横向钢筋的间距;

基金项目: 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金资助计划资助;

甘肃省交通科技计划项目: 复杂地质条件下深埋特长公路隧道修建关键技术研究——新七道梁隧道信息化施工技术研究

收稿日期: 2006-06-27

5 结语

本隧道按优化设计方案进行施工, 进展顺利, 地表沉降、周边收敛、拱顶下沉等重要参数均得到较好的控制, 2006 年 7 月 7 日本隧道顺利贯通。

通过对本隧道病害的处理和优化设计, 对围岩类别很差、极度破碎、浅埋条件下隧道的设计和施工方面积累了一定的经验。

α_i 为钢筋的剪切角,一般采用 $\alpha_i=45^\circ$ 。

(3) 锚杆提供的支护抗力 P_3 。

根据锚杆受力破坏情况的不同,取式(4)中的较小值作为 P_3 。

$$P_3 = \left. \begin{aligned} & \frac{F\sigma}{e \cdot t} \cdot \frac{2(\theta_0 - \alpha)}{\pi} \\ & \frac{S}{e \cdot t} \cdot \frac{2(\theta_0 - \alpha)}{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: F 为锚杆的断面积; σ 为锚杆的抗拉强度; e 、 t 为锚杆纵向及横向间距; S 为锚杆抗拔力,由锚杆拉拔试验求得; $\theta_0 = \alpha + \frac{1}{\tan \alpha} \ln \left(\frac{a+W}{a} \right)$, W 为围岩加固带的厚度,其值为:

$$W = (a+l) \left[\cos \left(\frac{t}{2a} \right) + \sin \left(\frac{t}{2a} \right) \tan \left(\frac{t}{2a} + \frac{\pi}{4} \right) - \right.$$

$$\left. \frac{\sin \left(\frac{t}{2a} \right)}{\cos \left(\frac{t}{2a} + \frac{\pi}{4} \right)} \right] - a$$

l 为形成加固带时锚杆的有效长度; a 为坑道半径; t 为锚杆的横向间距。

(4) 钢拱架提供的支护抗力 P_4 。

计算时,可换算成相应的喷混凝土支护抗力,即:

$$P_4 = \frac{2F_s \tau_s}{A_s b \sin \alpha_i} \cos \psi \quad (5)$$

式中: F_s 为一榀钢拱架的截面积; τ_s 为钢拱架材料的抗剪强度; A_s 为钢拱架的间距。

按照上述公式可计算出如图 1 所示的新七道梁隧道 II 型衬砌段喷锚支护所提供的最大支护抗力。

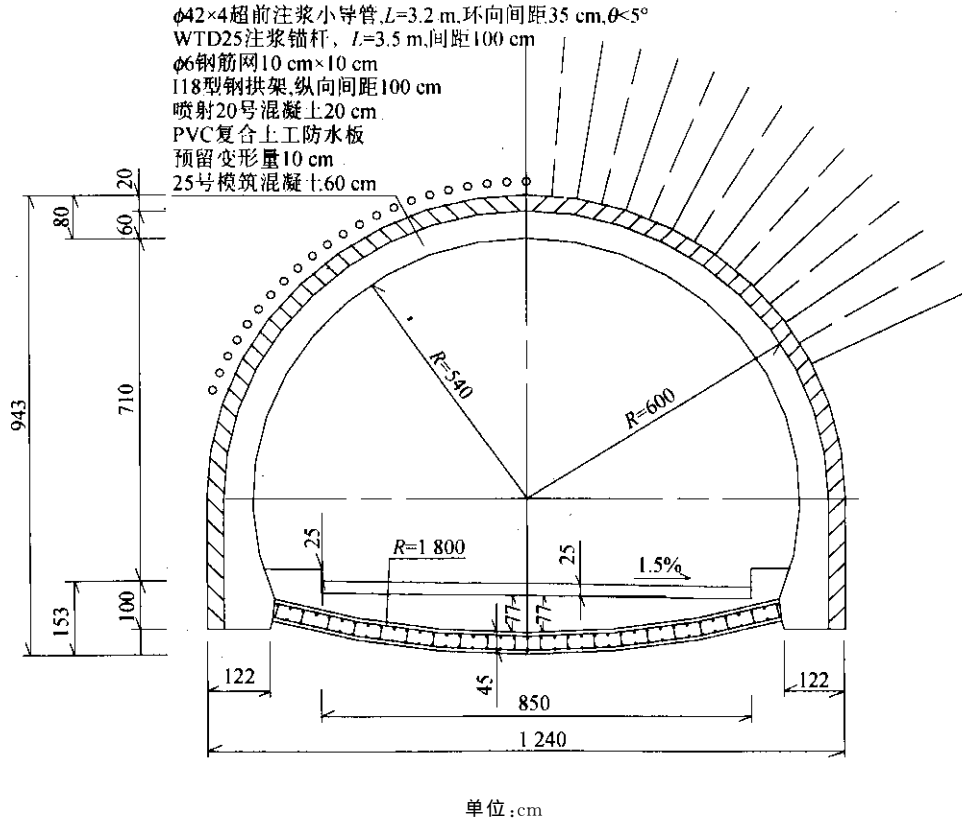


图 1 新七道梁 II 型衬砌设计

2 隧道位移反分析及工程应用

在隧道开挖之前,地层中存在由自重应力和构造应力构成的初始应力场,其分量为 σ_{xx}^0 、 σ_{yy}^0 和 σ_{xy}^0 。在开挖后,坑道周边将产生开挖释放荷载,由此产生二次扰动应力场和相应的位移场,当修筑喷锚支护后,将平衡掉一部分释放应力,形成了三次应力场和位移场,则最终的应力场为由未平衡掉的开挖释放荷

载所产生的扰动应力场与初始应力场的叠加,而位移场仅仅是由未平衡掉的开挖释放荷载所产生的扰动位移场。

采用平面应变边界元法^[7],将洞室的周边线近似用 N 条直线段单元来表示,且将任意单元 i 中点处与该单元的局部坐标系相应的初始地应力分量记为 $(\sigma_s^i)_0$ 、 $(\sigma_n^i)_0$ 、 $(\sigma_{sn}^i)_0$ 。在开挖的洞壁上,边界单元

面力 t_l^i ($l=s, n$) 为:

$$t_l^i = (t_l^i)_0 + (t_l^i)' \quad (l=s, n; i=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

式中: $(t_s^i)_0 = (\sigma_{sn}^i)_0$, $(t_n^i)_0 = (\sigma_n^i)_0$, $(t_l^i)'$ 为开挖释放荷载。

假定洞室在开挖后只有法向的喷锚支护抗力, 即:

$$t_s^i = 0, t_n^i = P_{\text{抗}}^i \quad (7)$$

则开挖释放荷载引起的应力边界条件式为:

$$\left. \begin{aligned} (t_s^i)' &= - (t_s^i)_0 = - (\sigma_{sn}^i)_0 \\ &= - \left[\frac{1}{2} (\sigma_{yy}^0 - \sigma_{xx}^0) \sin 2\beta_i + \sigma_{xy}^0 \cos 2\beta_i \right] \\ (t_n^i)' &= P_{\text{抗}}^i - (t_n^i)_0 = P_{\text{抗}}^i - (\sigma_n^i)_0 \\ &= P_{\text{抗}}^i - [\sigma_{xx}^0 \sin^2 \beta_i + \sigma_{yy}^0 \cos^2 \beta_i - \sigma_{xy}^0 \sin 2\beta_i] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: β_i 为单元切线与 x 轴正向的夹角。

根据李世辉等著的《隧道支护设计新论·典型类比分析法应用和理论》^[2], 有:

$$P_{\text{抗}}^i = K_a K_R \left(\frac{H}{L} \right)^A \left(\frac{\sigma_{xx}^0}{\sigma_{yy}^0} \right)^B P \quad (9)$$

式中: K_a 为根据典型工程实测数据反馈分析得到的修正系数; K_R 为根据不同洞室高跨比、侧压系数的修正, 再经过统计得出的围岩类别修正系数; H 为洞室的高度; L 为洞室的跨度; σ_{xx}^0 为初始水平地应力; σ_{yy}^0 为初始铅垂地应力, 侧压力系数 $\lambda = \sigma_{xx}^0 / \sigma_{yy}^0$; P 为喷锚支护的最大径向支护抗力; A 为根据典型工程实例资料由统计与试凑得出, $A = 1.25$; B 为根据典型工程实例资料由统计与试凑得出, $B = 0.25$ 。

采用边界元法将坑道周边离散成 N 个单元, 根据虚拟力法以应力边界条件建立求解均布虚拟力量的基本方程组^[2,4,5,6], 求解各单元虚拟力后, 围岩任意点最终的应力分量、位移分量即可确定。

按照给定的专家经验反复试算, 逐次改变侧压系数 λ 及等效弹性模量 E , 试凑修正运行过程, 从而使断面特征点 (相应于洞周收敛测点) 的位移分析值相应改变, 使其逐渐接近给定的实测值, 当符合如下精度要求时, 就确定了反分析结果 λ 和 E 的值:

$$\frac{|K_1 - K_2|}{\max(|K_1|, |K_2|)} \leq 0.03 \quad (10)$$

式中: $K_1 = \frac{U_{VM}}{U_{HM}}$; $K_2 = \frac{U_V}{U_H}$; U_{VM} 为拱顶下沉位移量测值; U_{HM} 为洞周水平位移量测值; U_V 为拱顶边

界单元铅垂位移分析值; U_H 为洞周边界单元水平位移分析值。

对于新七道梁隧道 K20+680 断面, 采用边界元法将坑道周边离散为 21 个单元, 由于对称性, 只取一半, 如图 2 所示。根据实测结果, 坑道水平位移为 $u = 4$ mm, 拱顶下沉位移为 $v = 6.112$ mm, 取初始的竖向应力场为自重应力场, 即 1.955 MPa, 进行位移反分析后得到初始地应力侧压系数 $\lambda = 1.04$, 等效弹性模量 $E = 4\,695$ MPa。

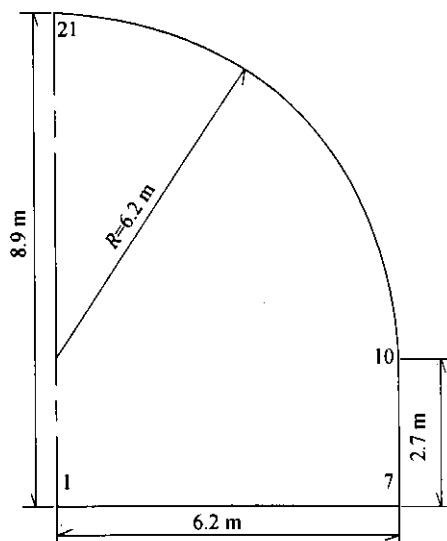


图 2 边界元离散图

对于新七道梁隧道, 取初始的竖向应力场为自重应力场, 即 $\sigma_y = 1.955$ MPa, 根据位移反分析得到的初始地应力侧压系数 ($\lambda = 1.04$), 可近似取 $\lambda = 1$, 等代圆半径 $R = 6.2$ m, $c = 0.5$ MPa, $\varphi = 33^\circ$, $\mu = 0.3$ 。将隧道的受力简化为无限体中的孔洞问题, 根据弹塑性理论解析公式, 可绘出新七道梁隧道围岩的弹塑性三次应力场, 如图 3 所示, 同时也可计算出塑性区半径 $r_0 = 7.49$ m, 坑道周边的弹塑性三次径向位移为 $u_a = 8.727$ mm。

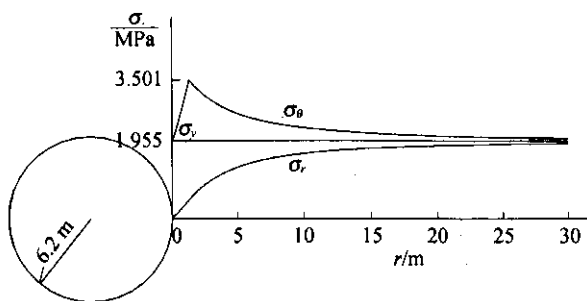


图 3 新七道梁隧道围岩的弹塑性三次应力场

3 结论

本文采用BMP90 程序进行了新七道梁隧道的位移反分析,然后根据反分析结果计算了围岩塑性区半径、坑道周边位移和应力场,通过分析可得以下结论。

(1)围岩的塑性区大概在距坑道周边 1.5 m 的范围内,说明锚杆的设计长度是合理的。

(2)坑道周边的弹塑性三次径向位移为 $u_a = 8.727\text{ mm}$,此值与实测位移比较吻合。

(3)由新七道梁隧道围岩的弹塑性三次应力场图可以看出,随着距洞周距离的不断增加, σ_r 和 σ_θ 逐渐趋近于初始应力 σ_y ,即在距离洞周为 10 m 处, σ_r 和 σ_y 相差 16.22%,在距离洞周为 20 m 处, σ_r 和 σ_y 相差 6.20%,在距离洞周为 30 m 处, σ_r 和 σ_y 相差 3.20%。说明该隧道的开挖主要影响的是距离洞周为 15 m 左右的围岩应力分布。

参考文献:

[1] 冯卫星. 铁路隧道设计[M]. 成都:西南交通大学出版

社,1998.

[2] 李世辉. 隧道支护设计新论[M]. 北京:科学出版社, 1999.
[3] 李世辉. 隧道围岩稳定系统分析[M]. 北京:中国铁道出版社,1991.
[4] Sakurai S, Takeuchi K. Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1983, 16(3).
[5] Najm K, Ishijima Y. Back Analysis of Tunnel Lining Deformation; Development and Application of Passive Resistance Method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993,26(1).
[6] Sakurai S, Takeuchi K. Back Analysis by Measured Displacements of Tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1983, 16(4)
[7] Shimigu N, Sakurai S. Application of BEM for Back Analysis Associated with Tunneling Problems[A]. Proc. of the 5th Int. Confr. on Bem, A Comput. Mech. Centre Publication, Springer—Verlag, 1983.

Back Analysis of Measured Displacements of New Qidaoliang Tunnel and Application in Engineering

LI De-wu¹, HAN Wen-feng², JING Ren³

(1. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3. Traffic Planning and Design Institute of Gansu Province, Lanzhou 730030, China)

Abstract: On the basis of the actual project in the new Qidaoliang Tunnel, the surrounding rock is simplified to continuous isotropic elastic material and the resisting forces supplied by bolting and spray concrete are regarded as boundary element. According to the actually measured convergence and subsidence of vault, back analysis of measured displacements is made with the help of plane strain boundary element program BMP90. The side pressure coefficient for the initial strength and equivalent elastic modulus of the surrounding rock are determined. After that, the displacements and stress field are analyzed with the back analysis results.

Key words: tunnel; back analysis of measured displacements; boundary element method