

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2467-06

基于接触应力反分析的隧道初期支护结构内力研究

文竞舟^{1,2}, 张永兴^{1,2}, 王 成³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
3. 重庆交通大学 隧道及岩土工程系, 重庆 400074)

摘 要: 利用现场监控量测的数据及时分析和评价支护结构的内力是隧道动态设计和施工的关键问题, 对保证隧道施工的安全具有重要意义。根据初期支护中喷射混凝土自身特点, 将喷层结构视为弹性地基曲梁, 并运用弹性地基曲梁理论, 通过喷射混凝土与围岩接触应力推求喷层结构内力的解析解, 从而得到喷层结构的应力集中部位, 方便后续制定施工安全措施。经台阶法开挖的隧道工程实例分析表明, 从喷层与围岩接触应力出发来求解喷层结构内力解析式是隧道内力分析一种新的有效方法, 为隧道结构的安全评估提供比较可靠的依据。

关 键 词: 公路隧道; 监控量测; 喷射混凝土; 接触应力; 弹性地基曲梁

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Back analysis of internal force of initial support in tunnel based on touch stress

WEN Jing-zhou^{1,2}, ZHANG Yong-xing^{1,2}, WANG Cheng³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for
Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Department of Tunnel and Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Using monitoring data to analyze and evaluate internal force of supporting structure is an important problem in dynamic design and construction of tunnel, which has great significance for construction safety. According to the characteristics of shotcrete layer in initial support and the theory of circular beam on elastic foundation, based on touch stresses between shotcrete layer and surrounding rock, the analytical solution of internal force is deduced. The stress concentration position is obtained, which is convenient to make relative safety countermeasures in the following construction. The analysis of tunnel project excavated by bench method shows that the analytical expression of solving internal force based on touch stresses is a new and effective way, so as to provide a more reliable basis for the safety assessment of tunnel structures.

Key words: highway tunnel; monitoring measurement; shotcrete; touch stress; circular beam on elastic foundation

1 引 言

复合式衬砌已成为我国隧道工程中最常见的衬砌形式, 根据其承载机制, 初期支护是主要承载结构。因此, 研究隧道初期支护结构的内力状态具有重要现实意义, 既是分析隧道结构施工安全状况的重要依据, 也是反馈评价隧道设计合理性的基础。

目前针对隧道结构内力的研究多采用有限元、边界元等数值分析, 由于隧道围岩相关参数具有不确定性, 其计算结果与实际有较大出入, 不能作为

设计的直接依据。正是由于隧道工程中存在大量的不可预见因素, 现场监控量测在隧道施工中得到广泛运用和发展^[1], 并为隧道反分析^[2-4]提供大量的数据。如何更好地利用这些量测数据定量客观地分析隧道围岩和支护的安全性已变得越来越重要。

通过量测的隧道初期支护喷射混凝土与围岩的径向接触应力, 可以衡量随开挖不断进行, 支护与围岩相互作用的强弱程度, 探讨喷层与围岩共同作用的特征和评判支护效果及隧道稳定性^[5]。本文根据隧道喷层自身特点出发, 运用弹性地基曲梁理论,

收稿日期: 2010-01-21

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (No. 50625824); 黔科合重大专项 (No. [2008]6018)。

第一作者简介: 文竞舟, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事隧道结构及监测方面的研究。E-mail: wenjingzhou117@163.com

以现场实测喷射混凝土与围岩接触应力为基本参数, 针对施工中初期支护喷层结构内力进行解析研究。

2 隧道喷层力学模型

公路隧道根据不同的围岩地质条件, 开挖方式可采用全断面或台阶法开挖, 洞室开挖后, 实施锚杆和喷射混凝土支护。其中, 喷射混凝土支护具有以下 3 个特点:

首先, 具有一定刚度的喷层能与围岩紧密黏结, 共同变形; 其次, 隧道喷层拱部往往接近于圆弧形, 隧道喷层的厚度远小于围岩周长; 而且在隧道未实施仰拱或二次衬砌前, 对整个隧道断面, 隧道初期支护呈未封闭状态。综上所述, 可将喷射混凝土层视为弹性地基曲梁^[6-8], 隧道围岩则考虑为弹性地基, 喷层与围岩相互作用力相当于地基反力, 且围岩地基对曲梁的反作用力垂直于曲梁的表面; 对分析围岩压力作用下的初期支护喷层结构可按弹性地基曲梁进行计算分析。

2.1 喷层地基曲梁控制微分方程

图 1(a)为一段圆弧形隧道拱部喷射混凝土支护层, 其中喷层内外半径分别为 r_0 和 r_i , 则喷层厚度为 $h = r_1 - r_0$, 断面面积为 A , 断面惯性矩为 I , 中心半径 $r_i = (r_1 + r_0)/2$ 。

截取受力单元 $r_i d\theta$ (如图 1(b)所示), 其中 $\omega(\theta)$ 为径向位移; K 为围岩抗力系数; $M(\theta)$ 为起始断面弯矩, $Q(\theta)$ 为剪力, $N(\theta)$ 为轴力。上述各力均以图示方向为正向。

根据图 1(b)所示的单元受力状况, 建立微元段的水平、竖直和对圆心的力矩平衡方程, 略去高阶微量后, 得

$$dQ(\theta) + N(\theta)d\theta + K\omega(\theta)r_i d\theta = 0 \quad (1)$$

$$Q(\theta)d\theta - dN(\theta) = 0 \quad (2)$$

$$dM(\theta) - r_i dN(\theta) = 0 \quad (3)$$

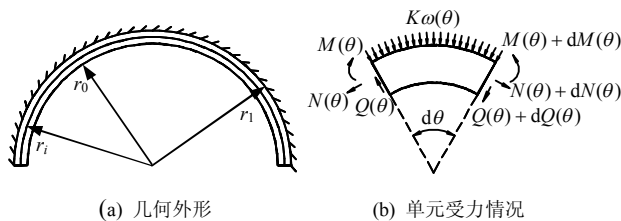


图 1 喷射混凝土地基曲梁计算简图

Fig.1 Calculation diagram for circular beam on shotcrete foundation

由结构力学知, 曲梁径向位移 $\omega(\theta)$ 与截面内力间有如下关系^[8]:

$$\frac{d^2 \omega(\theta)}{d\theta^2} + \omega(\theta) = \frac{M(\theta)r_i^2}{E_c I} + \frac{N(\theta)r_i}{E_c A} \quad (4)$$

式中: E_c 为混凝土的弹性模量。

对式 (4) 中 θ 分别求导一次和三次, 得

$$\frac{d^3 \omega(\theta)}{d\theta^3} + \frac{d\omega(\theta)}{d\theta} = \frac{r_i^2 dM(\theta)}{E_c I d\theta} + \frac{r_i dN(\theta)}{E_c A d\theta} \quad (5)$$

$$\frac{d^5 \omega(\theta)}{d\theta^5} + \frac{d^3 \omega(\theta)}{d\theta^3} = \frac{r_i^2 d^3 M(\theta)}{E_c I d\theta^3} + \frac{r_i d^3 N(\theta)}{E_c A d\theta^3} \quad (6)$$

由式 (5) 与式 (6) 相加得

$$\frac{d^5 \omega(\theta)}{d\theta^5} + 2 \frac{d^3 \omega(\theta)}{d\theta^3} + \frac{d\omega(\theta)}{d\theta} = \frac{r_i^2 d^3 M(\theta)}{E_c I d\theta^3} + \frac{r_i d^3 N(\theta)}{E_c A d\theta^3} + \frac{r_i^2 dM(\theta)}{E_c I d\theta} + \frac{r_i dN(\theta)}{E_c A d\theta} \quad (7)$$

联立式 (1) ~ (3)、(7), 导出关于径向位移 $\omega(\theta)$ 的 5 阶常系数微分方程为

$$\frac{d^5 \omega(\theta)}{d\theta^5} + 2 \frac{d^3 \omega(\theta)}{d\theta^3} + m^2 \frac{d\omega(\theta)}{d\theta} = 0 \quad (8)$$

式中: $m^2 = 1 + K r_i \left(\frac{r_i^3}{E_c I} + \frac{r_i}{E_c A} \right)$ 。

进而式 (8) 通解的特征方程即为

$$\lambda^5 + 2\lambda^3 + m^2 \lambda = 0$$

解得的特征方程根为

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_{2,3} = \alpha \pm i\beta, \quad \lambda_{4,5} = -(\alpha \pm i\beta)$$

式中: $\alpha = \sqrt{\frac{m-1}{2}}$, $\beta = \sqrt{\frac{m+1}{2}}$, $i = \sqrt{-1}$;

则式 (8) 的通解^[6]为

$$\omega(\theta) = C_0 + C_1 \cosh \alpha \theta \cos \beta \theta + C_2 \sinh \alpha \theta \cos \beta \theta + C_3 \cosh \alpha \theta \sin \beta \theta + C_4 \sinh \alpha \theta \sin \beta \theta \quad (9)$$

式中: C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为积分常数。

2.2 隧道初期支护喷层内力解析计算

根据式 (2)、(3)、(5) 得

$$Q(\theta) = \left(\frac{r_i^3}{E_c I} + \frac{r_i}{E_c A} \right)^{-1} \left[\frac{d^3 \omega(\theta)}{d\theta^3} + \frac{d\omega(\theta)}{d\theta} \right] \quad (10)$$

由式 (1) 和式 (10), 得

$$N(\theta) = -\left(\frac{r_i^3}{E_c I} + \frac{r_i}{E_c A}\right)^{-1} \left[\frac{d^4 \omega(\theta)}{d\theta^4} + \frac{d^2 \omega(\theta)}{d\theta^2} \right] - K r_i \omega(\theta) \quad (11)$$

由式(4)和式(11), 得

$$M(\theta) = \frac{E_c I}{r_i^3} \left\{ \frac{d^2 \omega(\theta)}{d\theta^2} + \omega(\theta) + \left(\frac{r_i^2 A}{I} + 1 \right)^{-1} \left[\frac{d^4 \omega(\theta)}{d\theta^4} + \frac{d^2 \omega(\theta)}{d\theta^2} \right] + \frac{r_i}{E_c A} K r_i \omega(\theta) \right\} \quad (12)$$

由式(9)~(12), 有

$$Q(\theta) = T [C_1 (A_1 \text{sh} \alpha \theta \cos \beta \theta + A_2 \text{ch} \alpha \theta \sin \beta \theta) + C_2 (A_1 \text{ch} \alpha \theta \cos \beta \theta + A_2 \text{sh} \alpha \theta \sin \beta \theta) + C_3 (A_1 \text{sh} \alpha \theta \sin \beta \theta - A_2 \text{ch} \alpha \theta \cos \beta \theta) + C_4 (A_1 \text{ch} \alpha \theta \sin \beta \theta - A_2 \text{sh} \alpha \theta \cos \beta \theta)] \quad (13)$$

式中: $A_1 = \alpha^3 - 3\alpha\beta^2 + \alpha$; $A_2 = \beta^3 - 3\alpha^2\beta - \beta$;

$$T = \left(\frac{r_i^3}{E_c I} + \frac{r_i}{E_c A} \right)^{-1}.$$

曲梁截面角位移 $\phi(\theta)$ 的表达式为

$$\phi(\theta) = \frac{d\omega(\theta)}{ds} = \frac{d\omega(\theta)}{r_i d\theta} = r_i^{-1} [(\alpha C_1 + \beta C_4) \cdot \text{sh} \alpha \theta \cos \beta \theta + (\alpha C_4 - \beta C_1) \text{ch} \alpha \theta \sin \beta \theta + (\alpha C_2 + \beta C_3) \text{ch} \alpha \theta \cos \beta \theta + (\alpha C_3 - \beta C_2) \text{sh} \alpha \theta \sin \beta \theta] \quad (14)$$

公路隧道断面形式一般关于竖直轴对称, 当为非偏压隧道时, 可假定隧道围岩荷载也关于竖直轴对称, 即可利用结构和荷载对称性, 并以隧道竖直轴所在断面为起始断面, 有 $Q_0 = Q(0) = 0$, $\phi_0 = \phi(0) = 0$ 。将 Q_0 和 ϕ_0 代入式(13)、(14)中, 有

$$C_2 A_1 - C_3 A_2 = 0 \quad (15)$$

$$\alpha C_2 + \beta C_3 = 0 \quad (16)$$

将式(16)代入式(15), 有

$$C_2 (\alpha^3 - 3\alpha\beta^2) - C_3 (\beta^3 - 3\alpha^2\beta) = 0 \quad (17)$$

又式(16)和式(17)可改写为

$$\begin{bmatrix} (\alpha^2 - 3\beta^2)C_2 & -(\beta^2 - 3\alpha^2)C_3 \\ C_2 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = 0$$

因为 α 、 β 为非0实数, 故

$$\begin{vmatrix} (\alpha^2 - 3\beta^2)C_2 & -(\beta^2 - 3\alpha^2)C_3 \\ C_2 & C_3 \end{vmatrix} = 0$$

由于 $\alpha^2 + \beta^2 \neq 0$, 必有 $C_2 C_3 = 0$, 再考虑式(16), 有

$$C_2 = C_3 = 0$$

故式(9)和式(13)可分别简化为

$$\omega(\theta) = C_0 + C_1 \text{ch} \alpha \theta \cos \beta \theta + C_4 \text{sh} \alpha \theta \sin \beta \theta \quad (18)$$

$$Q(\theta) = T [C_1 (A_1 \text{sh} \alpha \theta \cos \beta \theta + A_2 \text{ch} \alpha \theta \sin \beta \theta) + C_4 (A_1 \text{ch} \alpha \theta \sin \beta \theta - A_2 \text{sh} \alpha \theta \cos \beta \theta)] \quad (19)$$

联立式(11)和式(19), 得

$$N(\theta) = -K r_i C_0 - [K r_i C_1 + \alpha T (A_1 C_1 - A_2 C_4) + \beta T (A_2 C_1 + A_1 C_4)] \text{ch} \alpha \theta \cos \beta \theta - [K r_i C_4 + \alpha T (A_2 C_1 - A_1 C_4) - \beta T (A_1 C_1 + A_2 C_4)] \text{sh} \alpha \theta \sin \beta \theta \quad (20)$$

$$M(\theta) = \frac{B_1 K r_i + 1}{B_2} C_0 + \frac{1}{B_2} \{ [(K r_i + \alpha T A_1 + \beta T A_2) B_1 + \alpha^2 - \beta^2 + 1] C_1 + [(\beta A_1 - \alpha A_2) T B_1 + 2\alpha\beta] C_4 \} \cdot \text{sh} \alpha \theta \cos \beta \theta + \frac{1}{B_2} \{ [(K r_i - \alpha T A_1 - \beta T A_2) B_1 + \alpha^2 - \beta^2 + 1] C_4 + [(\alpha A_2 - \beta A_1) T B_1 - 2\alpha\beta] \} \cdot \text{sh} \alpha \theta \sin \beta \theta \quad (21)$$

式中: $B_1 = \frac{r_i}{E_c A}$, $B_2 = \frac{r_i^2}{E_c I}$ 。

在已施作初期支护的隧道中, 喷层表面在围岩压力作用下容易产生裂纹甚至开裂, 因此, 需计算喷射混凝土层表面的切向应力 $\sigma_{\theta i}$,

$$\sigma_{\theta i} = \frac{N(\theta)}{A} + \frac{M(\theta)}{I} (r_i - r_0) \quad (22)$$

将式(20)和式(21)代入式(22)即可得 $\sigma_{\theta i}$ 的具体表达式。

在式(18)~(22)中, 只需将积分常数 C_0 、 C_1 、 C_4 求出, 即可得到隧道喷层的内力解析式。

2.3 用实测喷层与围岩径向接触应力求解积分常数

式(18)~(21)中的积分常数 C_0 、 C_1 、 C_4 可通过地基曲梁两端边界条件确定, 但实际工程中在围岩作用下的隧道喷层两端的外力是不易求得的。

考虑隧道喷射混凝土作为柔性支护, 具有良好的延展性, 能较好地与围岩紧密黏结; 当隧道喷层施作后, 围岩变形将对喷层形成形变压力, 也反应

为喷层支护给围岩的抗力, 即

$$p(\theta) = K\omega(\theta) \quad (23)$$

形变压力 $p(\theta)$ 可通过安设在围岩与喷射混凝土之间的应力计进行量测。布设时, 应力计的承压板应紧贴围岩面, 指向隧道中心点; 当围岩向内挤压时, 应力计开始工作。利用这种应力计测得的力近似为 $p(\theta)$ 。

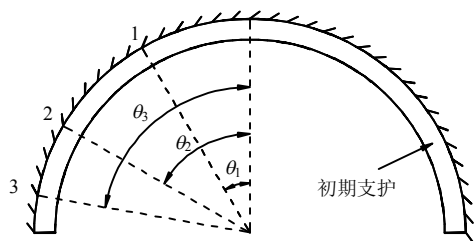


图2 隧道断面上应力计埋设示意图

Fig.2 Embedding sketch of stress gauges in tunnel section

对于非偏压隧道, 可将应力计布置在拱部的一侧, 如图2所示1~3为3个应力计测点, 其埋设位置与隧道中心连线的竖直夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。

按弹性地基梁局部变形理论, 可得

$$\frac{p(\theta_1)}{K} = C_0 + C_1 a_1 + C_4 b_1 \quad (24)$$

$$\frac{p(\theta_2)}{K} = C_0 + C_1 a_2 + C_4 b_2 \quad (25)$$

$$\frac{p(\theta_3)}{K} = C_0 + C_1 a_3 + C_4 b_3 \quad (26)$$

联立式(24)~(26), 解得积分常数为

$$C_1 = \frac{p(\theta_1) - p(\theta_3) - \frac{p(\theta_1) - p(\theta_2)}{b_1 - b_2}(b_1 - b_3)}{\left[a_1 - a_3 - \frac{a_1 - a_3}{b_1 - b_2}(b_1 - b_3) \right] K} \quad (27)$$

$$C_4 = \frac{p(\theta_1) - p(\theta_3) - \frac{p(\theta_1) - p(\theta_2)}{a_1 - a_2}(a_1 - a_3)}{\left[b_1 - b_3 - \frac{b_1 - b_2}{a_1 - a_2}(a_1 - a_3) \right] K} \quad (28)$$

$$C_0 = \frac{p(\theta_1)}{K} - \frac{a_1}{K} \frac{p(\theta_1) - p(\theta_3) - \frac{p(\theta_1) - p(\theta_2)}{b_1 - b_2}(b_1 - b_3)}{a_1 - a_3 - \frac{a_1 - a_3}{b_1 - b_2}(b_1 - b_3)} - \frac{b_1}{K} \frac{p(\theta_1) - p(\theta_3) - \frac{p(\theta_1) - p(\theta_2)}{a_1 - a_2}(a_1 - a_3)}{b_1 - b_3 - \frac{b_1 - b_2}{a_1 - a_2}(a_1 - a_3)} \quad (29)$$

式中: $a_1 = \text{ch}\alpha\theta_1 \cos\beta\theta_1$; $b_1 = \text{sh}\alpha\theta_1 \sin\beta\theta_1$; $a_2 = \text{ch}\alpha\theta_2 \cos\beta\theta_2$; $b_2 = \text{sh}\alpha\theta_2 \sin\beta\theta_2$; $a_3 = \text{ch}\alpha\theta_3 \cos\beta\theta_3$; $b_3 = \text{sh}\alpha\theta_3 \sin\beta\theta_3$ 。

将式(27)~(29)代入式(18)~(22)中, 即得到利用喷层与围岩接触应力求得的初期支护喷层结构内力解析式。

3 工程实例分析

某公路隧道开挖方式为上下台阶法开挖, 如图3所示, I为上台阶, 开挖后断面近似于半圆形; II为下台阶。初期支护采用锚喷支护, 喷层中布有钢筋网。

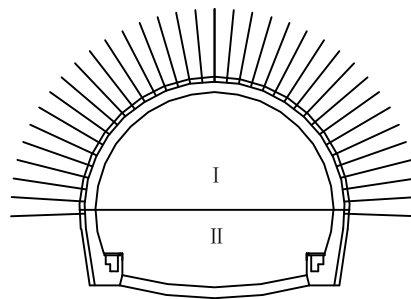


图3 隧道台阶法开挖断面示意图

Fig.3 Sketch of tunnel section excavated by bench method

现取单位长度的初期支护进行计算分析, 隧道初期支护喷射混凝土层的几何参数和计算参数取值见表1、2。

表1 隧道上台阶断面几何参数
Table 1 Geometric parameters of tunnel upper bench

喷层厚度 h / cm	开挖半径 r_1 / cm	隧道中心半径 r_0 / cm	圆心角 θ / rad	横截面积 A / cm^2
20	560	550	$\pi/2$	2 000

表2 计算参数取值
Table 2 Values of calculation parameters

C20 喷混凝土弹性模量 E_c / GPa	公路III级围岩弹性抗力系数 $K / (\text{MPa/m})$
21	600

注: 围岩弹性抗力系数 K 取值来自工程地勘报告。

在隧道现场, 喷射混凝土与围岩径向接触应力的量测元件采用 MYB-150 混凝土埋入式钢弦应力计。当开挖面不断向前掘进, 埋设测点所在断面的围岩应力不断释放, 围岩将产生向内的位移, 此时应力计上的两端承压板分别受到围岩和喷层的挤

压, 承压板的空心夹层受到压缩, 内部的流体压力使传感器弹性模板发生挠曲, 钢弦自振频率随固定在模板上的钢弦变化而变化。用频率计量测某一时刻的频率, 与初始时刻的频率, 换算后即可求得此刻的接触应力。

隧道实施初期支护一段时间后, 某监测断面的围岩与喷射混凝土接触应力最大值及测点所在位置见表 3。

表 3 喷层与围岩接触应力量测值
Table 3 Touch stress measurements between shotcrete layer and surrounding rock

测点编号	测点与隧道中心连线的竖向夹角 $\theta_i / (^{\circ})$	接触应力 $p(\theta_i) / \text{kPa}$
1	30	25
2	60	19
3	90	16

将上述量测的接触应力和计算参数代入本文推导的相关解析式中, 得到该隧道初期支护结构的各种内力值。利用对称性, 将隧道结构的一半进行计算, 并将结果绘制成如图 4~7 所示的内力图。

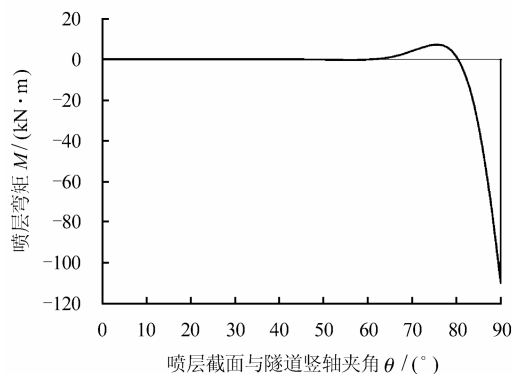


图 4 喷层弯矩图

Fig.4 Bending moment diagram of shotcrete layer

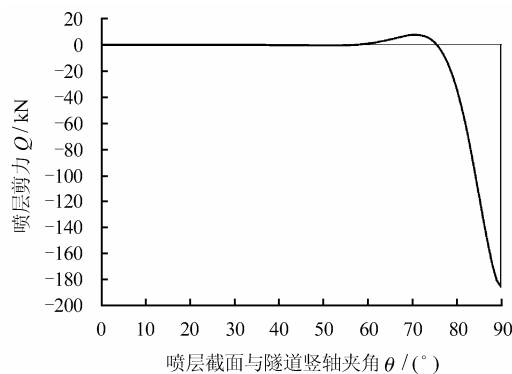


图 5 喷层剪力图

Fig.5 Shear force diagram of shotcrete layer

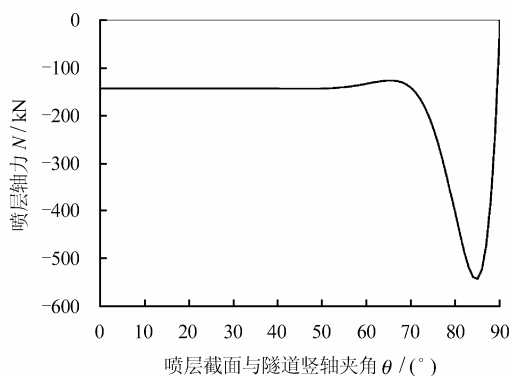


图 6 喷层轴力图

Fig.6 Axial force diagram of shotcrete layer

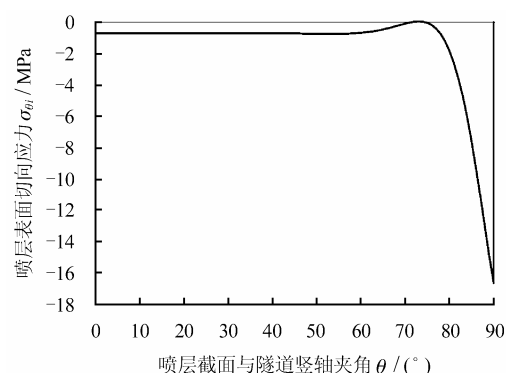


图 7 喷层表面切向应力图

Fig.7 Tangent stress diagram of shotcrete layer surface

根据以上内力图可知, 该测点所在断面开挖后第 15 d, 拱顶处受力较小, 是安全的。但拱脚处的负弯矩和剪力较大; 喷层各截面均受压, 并在拱脚附近压应力较大; 喷层表面切向应力主要为压应力, 在拱脚处很大。

其中, 最大喷层表面压应力为 16.63 MPa, 在拱脚处, 与文献[9]中 C20 喷射混凝土的设计弯曲抗压强度为 11 MPa 相比, 已经破坏; 最大喷层表面拉应力为 0.059 MPa, 是安全的; 喷层最大轴向压力为 13.65 MPa, 在拱脚附近, 与文献[9]中 C20 喷射混凝土的设计轴向抗压强度 10 MPa 相比, 已经破坏。

根据上述分析结果, 有如下建议:

(1) 该断面应立即加强拱脚的支护, 可采取二次喷射混凝土或增加锁脚锚杆; 可实施下台阶和仰拱施工, 尽快彻底封闭围岩。

(2) 在后续喷射混凝土支护中, 宜适当提高喷射混凝土强度等级, 建议采用 C25。

(3) 在后续开挖中, 可通过采取降低上台阶开挖高度来减小拱脚受力。

由于公路隧道为带状构造物, 往往同一条隧道穿越不同的地层结构, 围岩参数的变化也会引起初期支护内力有明显的改变。

4 结 论

(1) 首次应用实测喷层与围岩接触应力为基本参数推求隧道初期支护喷层的内力解析表达式, 并经台阶法开挖的隧道工程实例分析表明, 该方法计算结果能直接反映初衬结构的应力状态。

(2) 提出的解析计算方法适用于分析未封闭成环的初期支护, 并能估算初期支护结构的薄弱部位, 为施工过程安全决策提供依据。

(3) 对于其他隧道运用本文方法, 只要有符合本文条件的应力测点数据, 即可实时判断初期支护内力状态。

参 考 文 献

- [1] 黄宏伟, 徐凌. 大风垭口公路隧道围岩及初期支护变形与内力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 44—52.
HUANG Hong-wei, XU Ling. Study of deformation and internal force of surrounding rocks and initial support in Dafengyakou rock road tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(1): 44—52.
- [2] 徐明新, 杨成永, 张强. 施工期隧道喷混凝土支护安全性评价[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(1): 1—6.
XU Ming-xin, YANG Cheng-yong, ZHANG Qiang. Assessment on the safety of shotcrete lining during tunnel construction[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2008, 32(1): 1—6.
- [3] KARMEN F B, BORUT P. Displacement analysis of tunnel support in soft rock around a shallow highway tunnel at Golovec[J]. **Engineering Geology**, 2004, (75): 89—106.
- [4] SHUNSUKE S, SHINICHI A, KUNIFUMI T, et al. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18(2): 185—196.
- [5] 陈耕野, 刘斌, 万明富, 等. 韩家岭大跨度公路隧道应力监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5509—5515.
CHEN Geng-ye, LIU Bin, WAN Ming-fu, et al. Analysis of stress monitoring of a large-span highway tunnel in Hanjialing mountain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Sup2.): 5509—5515.
- [6] 梁政. 埋地管道对称水平弯头的弹性地基曲梁解[J]. 西南石油学院学报, 1989, 11(3): 65—74.
LIANG Zheng. Solution to circular arches on the elastic foundation of the symmetrical horizontal buried pipeline elbow[J]. **Journal of Southwest Petroleum Institute**, 1989, 11(3): 65—74.
- [7] 孙富学, 蔡晓鸿, 朱云辉. 基于初参数法的多心圆拱隧道衬砌结构内力与变位求解[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1127—1130.
SUN Fu-xue, CAI Xiao-hong, ZHU Yun-hui. Analytical solution of internal force and displacement in multi-center circular arc tunnel lining based on initial parameter method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 1127—1130.
- [8] 蔡晓鸿, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB 50086—2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.

书 讯

隧道与地下工程

建筑科学类, 霍润科主编, 16 开, 262 页, 平膜装, 估价: 28 元, 2011 年 2 月出版, ISBN: 9787—112—12825—9。

本书共分 9 章, 系统地介绍了隧道与地下工程的勘察设计、主体及附属结构形式, 洞室围岩稳定性分析及围岩分级, 地下工程衬砌结构的计算, 隧道与地下工程支护与施工等基础知识和基本理论, 强调围岩与支护结构在隧道与地下工程重要作用, 突出经验类比, 理论分析、现场量测和超前地质预报等相结合的动态设计思想。同时对隧道与地下工程常用分析软件 ANSYS 和 FLAC3D 进行了介绍。本书内容由浅入深, 简洁明了, 通俗易懂。本书可作为普通高等院校教学用书, 还可作为从事隧道及地下工程设计、施工和科研人员的自学参考书。

(摘自 中国建筑书店)