

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.012

隧道围岩-喷射混凝土界面应力解析

文竞舟^{1a,1b}, 张永兴^{1a,1b}, 王成²

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

摘要:根据喷射混凝土支护隧道围岩的界面力学特点, 考虑喷层与围岩结合界面受力和变形协调关系, 并结合围岩承载拱效应, 建立了围岩-喷层结构的复合曲梁共同承载模型, 然后通过各微单元静力平衡推导复合曲梁的径向位移的控制微分方程, 得到任意分布荷载作用下喷层与围岩界面应力以及喷层与围岩各自内力的解析式, 可迅速获取喷层与围岩结合界面的力学状况, 进而判断围岩稳定性与预测安全性, 为隧道施工决策提供技术支撑。最后经隧道台阶法开挖的算例研究表明, 喷层支护通过其与围岩的结合界面上传递应力使围岩内部形成压应力带, 有利于围岩的稳定。

关键词:隧道工程; 喷射混凝土支护; 围岩承载拱; 界面应力; 复合曲梁

中图分类号:TU443 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)06-0067-08

Analysis on Interfacial Stress Between Surrounding Rock and Shotcrete Lining

WEN Jingzhou^{1a,1b}, ZHANG Yongxing^{1a,1b}, WANG Cheng²

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

Abstract: According to the characteristics of interfacial stress between surrounding rock and shotcrete support, mechanical model of composite curved beam for support system of tunnel surrounding rock and shotcrete lining was established, considering the interfacial deformation coordination and the effects of bearing arch of surrounding rock. Then from static equilibrium of two differential elements, the differential equations for the radial displacement of composite curved beam were obtained. All analytic formulas of both interfacial stress and internal forces between surrounding rock and shotcrete lining by arbitrary distribution load were derived. And thus the mechanical condition of interface zone and the stress concentration position were obtained, which is convenient to assess the stability of surrounding rock and predict the safety. Finally, the analysis of tunnel project excavated by bench method showed that shotcrete lining made the formation of compressive stress zone in surrounding rock by transferring stress from the interface between surrounding rock and shotcrete, which is beneficial to improve the stability of surrounding rock.

Key words: tunnel engineering; shotcrete lining; bearing arch of surrounding rock; interfacial stress; composite curved beam

收稿日期:2012-03-15

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1045);国家自然科学基金科学仪器基础研究专款(51027004)

作者简介:文竞舟(1983-),男,博士生,主要从事隧道及岩土结构及监测研究,(E-mail)wenjingzhou117@163.com。

张永兴(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)cqyxzhang@163.com。

喷射混凝土是一种具有一定支承抗力,又具有良好柔性的支护结构,拥有良好的力学和非力学性能,在隧道及地下工程中获得广泛和多方面的运用,与锚杆支护、监控量测并列为“新奥法”施工的现代隧道及地下工程中三大支柱^[1]。不论围岩性状如何变化,喷射混凝土支护依然在隧道初期支护环节中是不可缺少的、且是有效地支护手段,具有广泛的地质和工程适应性。其主要是喷射混凝土能及时地与围岩粘结,迅速给围岩表面提供抗力,阻止围岩松动开裂,有效地避免和缓解围岩的应力集中^[2],明显改变围岩周边的受力特征,进而能提高围岩自身承载能力,有效抑制围岩变形。

尽管多年来对隧道喷射混凝土的相关研究主要从喷射技术、支护力学机理、早期强度和材料特性以及工程运用等方面展开探讨^[3-10],而且不断深入并取得大量研究成果。但在目前涉及隧道喷层支护的研究中,尚缺少对喷层与周边围岩在接触界面上形成的密贴附着力及其力学模型的具体研究,而这点恰恰是喷层之所以能与围岩共同受力,形成相互协调的承载共同体并发挥支护作用的主要因素和首要条件,特别是在结合隧道施工条件下分析和描述喷射混凝土如何通过其与围岩界面传递应力并加固围岩使之与围岩共同承载的支护理论,更是鲜见报道和论述。

本文针对隧道工程中喷射混凝土的力学特性,根据“围岩-喷层支护”共同体的相互作用特点,并考虑喷层与围岩接触界面上变形协调关系,建立喷层与围岩结构的复合承载体的力学模型,可分析喷射砼与围岩界面力的影响,进而探讨喷层结构的力学特征和隧道围岩的稳定性。

1 喷层加固围岩复合承载体力学原理

隧道岩体开挖后,开挖空间周围通常会形成扰动区,这一区域的松动破碎状况将直接决定初期支护的强弱程度、隧道稳定性以及施工安全性。通过大量的研究表明围岩扰动区通过锚喷支护后,将形成围岩锚固组合拱,即使是破碎岩体的组合拱仍然具有承载能力^[11-13]。锚杆是从围岩内部进行力学加固,而喷层则是从围岩表面进行受力调整和加固。正是由于喷射混凝土层封闭了围岩,无法直接观察围岩,因此在施工中通过观测喷层支护变形和开裂状况能直观有效地评判支护结构和围岩的稳定状况^[14],显然在某种程度上可认为在初期支护阶段喷层是围岩-支护系统中最后一道屏障。

与围岩壁面全面、牢固地吸附接触是确保喷射

混凝土发挥作用的关键,即便是目前喷射钢纤维混凝土或者单层衬砌发挥支护作用的前提也是与围岩的密贴性和吸附性;喷层破坏形式和力学作用主要是剪切和附着破坏,压溃破坏是次要的^[2]。从力学机理上分析在喷层与周边围岩接触界面上产生抵抗拉伸剥离的抗拉附着力和沿接触界面上抵抗错动的切向剪切阻力将使喷射混凝土极大地发挥支护作用;同时接触界面上切向应力将传递至围岩,将有利于围岩内部形成拱状的压力带^[2,15],这从卸荷岩体力学的角度上将增大围岩稳定性;同时具有一定厚度且初期强度较高的喷层可视为拱形结构,由喷层轴力提供的对围岩的支护反力将使喷砼背后附近的围岩应力状态从一维变成三维受力状态,隧道的稳定性也将提高^[2]。因此,由喷层加固的围岩拱梁的复合承载结构更能体现“围岩-支护”共同承载体的力学特点,将极为有效地支护围岩。

2 喷层加固围岩复合承载体受力分析

2.1 基本假设与力学模型

根据隧道工程的围岩-喷层支护系统的特点,提出以下假设:

1)在实际工程中,不管是采用台阶法或全断面法施工的隧道,其围岩开挖面周边形状通常可近似为几段不同的曲率的圆弧所连接,其中隧道自起拱线以上断面一般近似为半圆形,喷层支护可以视为吸附在围岩上的一定厚度的曲梁结构。

2)通过相关文献^[11-12]研究表明,隧道围岩可近似为各向同性、均质连续的介质;开挖空间周围形成一种均匀破碎圈,在开挖后,通常会安装锚杆,由于岩石的碎胀作用,锚杆受力将对围岩产生约束阻力,系统锚杆将对隧道围岩锚固组合拱起到支护加固作用,显然开挖空间周围岩体通常会形成一定厚度的承载拱,可以将锚杆的长度视为围岩锚固组合拱的厚度^[13]。

3)由于喷射混凝土与围岩间的良好的吸附性能,使喷层与围岩成为一体。

因此可将隧道上台阶的喷层与锚杆加固后的围岩承载拱视为复合曲梁结构,如图1所示。

其中曲梁截面为喷层与围岩组合的矩形截面;原点O在曲率中心; $y-z_i$ (其中 $i = r, c$) 为建立在喷层、围岩各自截面形心上的直角坐标系, y 与 r_i 的负方向一致。喷层-围岩承载复合曲梁结构关于隧道断面竖轴对称,以此竖轴为 θ 的起始角度,顺时针为正。设喷层与围岩承载复合曲梁各自的中轴线到曲率中心O的距离分别为 R_c, R_r ; 喷层与围岩分界面

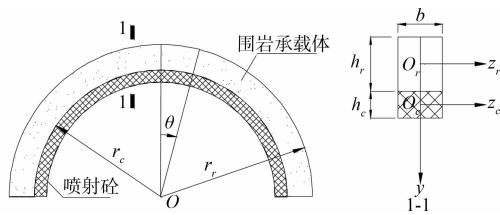


图 1 围岩-喷层复合曲梁及其截面示意图

到曲率中心 O 的距离为 r_c ; 喷层和围岩承载曲梁的厚度分别为 h_c 、 h_r ; 喷层和围岩承载曲梁的横截面面积分别为 $A_c = b_c h_c$ 、 $A_r = b_r h_r$; 现以喷层与围岩复合曲梁为研究对象, 分别对喷层单元 $R_c d\theta$ 和围岩单元 $R_r d\theta$ 进行受力分析如图 2 所示: N_c 、 Q_c 、 M_c 分别表示为喷层曲梁截面上的轴力、剪力和弯矩, 都是关于 θ 的函数; N_r 、 Q_r 、 M_r 分别表示为围岩承载曲梁的轴力、剪力和弯矩, 也都是关于 θ 的函数; 其中 σ 、 τ 为喷层与围岩界面间的径向正应力与切向剪应力; q_r 、 q_t 分别为作用在围岩承载曲梁上的径向、切向荷载集度, 也是关于 θ 的函数, 并以图示方向为正向。

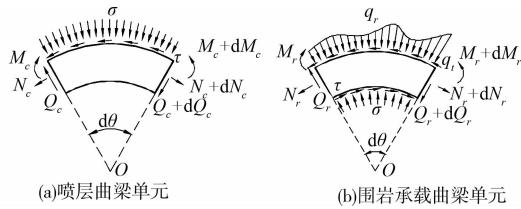


图 2 复合曲梁微元体简图

2.2 围岩-喷层的复合曲梁控制微分方程

现分别对围岩、喷层曲梁径向和切向方向上取静力平衡, 然后取关于曲率中心 O 的力矩平衡, 并略去高阶微量后, 有

1) 喷层结构:

$$N_c d\theta + dQ_c + \sigma r_c d\theta = 0 \quad (1)$$

$$dN_c - Q_c d\theta - \tau r_c d\theta = 0 \quad (2)$$

$$dM_c - R_c dN_c + \tau r_c^2 d\theta = 0 \quad (3)$$

2) 围岩结构:

$$N_r d\theta + dQ_r - \sigma r_r d\theta + q_r r_r d\theta = 0 \quad (4)$$

$$dN_r - Q_r d\theta + \tau r_r d\theta - q_r r_r d\theta = 0 \quad (5)$$

$$dM_r - R_r dN_r - \tau r_r^2 d\theta + q_r r_r^2 d\theta = 0 \quad (6)$$

为得到喷层和围岩承载曲梁的应变关系, 现考虑几何条件, 对喷层与围岩相互作用下的复合曲梁, 按其不同材料分别考虑, 先考虑喷层曲梁, 当其处在平面弯曲情况下, 外力均在喷层曲梁的纵向对称面内, 变形后的轴线依然为这一对称面内的曲线, 曲梁结构无扭转变形, 显然可采用平面假设, 即变形前垂直于轴线的横截面, 变形后仍为平面, 并垂直于变形

后的轴线。因此, 喷层曲梁的平面弯曲变形, 可由喷层截面形心 O_c 沿弧长方向 s_c 的位移为 u_c 、沿曲梁径向方向 y 的位移为 v_c , 以及喷层横截面绕 z_c 轴的转角为 $\psi_c = \frac{dv_c}{ds_c}$ 来表示。沿喷层截面形心轴取微段弧长 ds_c , 距喷层截面形心轴为 y_c 的纤维, 根据大曲率曲梁的应变公式^[16], 可得到喷层曲梁上距其截面形心轴为 y_c 的任一纤维的切向总应变为:

$$\epsilon_c = \left(\frac{du_c}{ds_c} - \frac{v_c}{R_c} \right) - \left(\frac{d^2 v_c}{ds_c^2} + \frac{v_c}{R_c^2} \right) \frac{y_c}{1 - \frac{y_c}{R_c}} \quad (7)$$

其中 $ds_c = R_c d\theta$, 喷层曲梁横截面正应力为:

$$\sigma_{cs} = E_c \left[\left(\frac{du_c}{ds_c} - \frac{v_c}{R_c} \right) - \left(\frac{d^2 v_c}{ds_c^2} + \frac{v_c}{R_c^2} \right) \frac{y_c}{1 - \frac{y_c}{R_c}} \right] \quad (8)$$

相应的喷层曲梁截面内力为:

$$N_c = \int_{A_c} \sigma_{cs} dA = E_c \left(\frac{du_c}{ds_c} - \frac{v_c}{R_c} \right) \int_{A_c} dA - E_c \left(\frac{d^2 v_c}{ds_c^2} + \frac{v_c}{R_c^2} \right) \int_{A_c} \frac{y_c dA}{1 - \frac{y_c}{R_c}} \quad (9)$$

$$M_c = \int_{A_c} y_c \sigma_{cs} dA = E_c \left(\frac{du_c}{ds_c} - \frac{v_c}{R_c} \right) \int_{A_c} y_c dA - E_c \left(\frac{d^2 v_c}{ds_c^2} + \frac{v_c}{R_c^2} \right) \int_{A_c} \frac{y_c^2 dA}{1 - \frac{y_c}{R_c}} \quad (10)$$

计算上式中的积分后, 并化简后, 得到:

$$N_c = E_c A_c \left(\frac{du_c}{ds_c} - \frac{v_c}{R_c} \right) - \frac{E_c J_{zc}}{R_c} \left(\frac{d^2 v_c}{ds_c^2} + \frac{v_c}{R_c^2} \right) \quad (11)$$

$$M_c = -E_c J_{zc} \left(\frac{d^2 v_c}{ds_c^2} + \frac{v_c}{R_c^2} \right) \quad (12)$$

其中 $J_{zc} = \int_{A_c} \frac{y_c^2}{(1 - \frac{y_c}{R_c})} dA$ 为喷层曲梁截面的抗弯惯性矩。同理, 围岩承载曲梁的平面弯曲变形, 可由其截面形心 O_r 沿弧长方向 s_r 的位移为 u_r 、沿曲梁径向方向 y 的位移为 v_r , 以及围岩承载曲梁横截面绕 z_r 轴的转角为 $\psi_r = \frac{dv_r}{ds_r}$ 来表示。因此, 围岩承载曲梁上距其形心轴线为 y_r 任一纤维的轴线总应变:

$$\epsilon_r = \left(\frac{du_r}{ds_r} - \frac{v_r}{R_r} \right) - \left(\frac{d^2 v_r}{ds_r^2} + \frac{v_r}{R_r^2} \right) \frac{y_r}{1 - \frac{y_r}{R_r}} \quad (13)$$

其中 $ds_r = R_r d\theta$, 围岩承载曲梁横截面正应力:

$$\sigma_{rs} = E_r \left[\left(\frac{du_r}{ds_r} - \frac{v_r}{R_r} \right) - \left(\frac{d^2 v_r}{ds_r^2} + \frac{v_r}{R_r^2} \right) \frac{y_r}{1 - \frac{y_r}{R_r}} \right] \quad (14)$$

相应的围岩承载曲梁截面内力为：

$$N_r = \int_{A_r} \sigma_n dA = E_r \left(\frac{du_r}{ds_r} - \frac{v_r}{R_r} \right) \int_{A_r} dA - \\ E_c \left(\frac{d^2 v_r}{ds_r^2} + \frac{v_r}{R_r^2} \right) \int_{A_r} \frac{y_r dA}{1 - \frac{y_r}{R_r}} \quad (15)$$

$$M_r = \int_{A_r} y_r \sigma_n dA = E_r \left(\frac{du_r}{ds_r} - \frac{v_r}{R_r} \right) \int_{A_r} y_r dA - \\ E_r \left(\frac{d^2 v_r}{ds_r^2} + \frac{v_r}{R_r^2} \right) \int_{A_r} \frac{y_r^2 dA}{1 - \frac{y_r}{R_r}} \quad (16)$$

计算上两式中的积分，并化简后，得到：

$$N_r = E_r A_r \left(\frac{du_r}{ds_r} - \frac{v_r}{R_r} \right) - \frac{E_r J_r}{R_r} \left(\frac{d^2 v_r}{ds_r^2} + \frac{v_r}{R_r^2} \right) \quad (17)$$

$$M_r = -E_r J_r \left(\frac{d^2 v_r}{ds_r^2} + \frac{v_r}{R_r^2} \right) \quad (18)$$

式中 $J_r = \int_{A_r} \frac{y_r^2}{(1 - \frac{y_r}{R_r})} dA$ 为围岩承载曲梁截面的抗弯惯性矩。

由于喷层与围岩曲梁的截面均为矩形，对 J_r 、 J_c 中被积函数展开成级数^[15]为：

$$J_i = \frac{b_i h_i^3}{12} \left(1 + \frac{3h_i^2}{20R_i^2} + \frac{3h_i^4}{112R_i^4} + \dots \right) \quad (19)$$

式中 $i = c, r$ 。

由于喷射混凝土与围岩的密贴性与吸附性的存在，进而使围岩与喷层共同受力，所以考虑围岩与喷射混凝土交界面上的变形协调关系，可认为其界面处应变相等，即：

$$\epsilon_c(y_c = -\frac{h_c}{2}) = \epsilon_r(y_r = \frac{h_r}{2}) \quad (20)$$

联立式(7)、(11)~(13)、(17)、(18)、(20)，有：

$$N_c = aN_r + bM_c + cM_r \quad (21)$$

其中 $a = \frac{E_c A_c}{E_r A_r}$, $b = \frac{1}{R_c} + \frac{A_c R_c h_c}{J_c (2R_c + h_c)}$,

$$c = -E_c A_c \left(\frac{1}{E_r A_r R_r} - \frac{1}{E_r J_r} \cdot \frac{R_r h_r}{2R_r - h_r} \right)。$$

考虑隧道喷层与围岩两曲梁的径向方向上无相对位移，即变形连续且无脱离，则有 $v = v_c = v_r$ 。

联立式(12)和(18)，有：

$$M_c = \beta M_r \quad (22)$$

其中 $\beta = \frac{E_c J_r R_r^2}{E_r J_r R_c^2}$ 。

联立式(1)~(6)、(12)、(18)、(21)、(22)有：

$$\frac{d^5 v}{d\theta^5} + 2 \frac{d^3 v}{d\theta^3} + \frac{dv}{d\theta} = A_1 \frac{d^2 q_t}{d\theta^2} + A_2 \frac{dq_r}{d\theta} + A_3 q_t \quad (23)$$

其中：

$$A_1 = -\frac{R_r^2 [(R_c a + R_r)r_r - (1+a)r_r^2]}{E_r J_r [(R_r - R_c)(\beta b + c) + (1+a)(1+\beta)]}$$

$$A_2 = \frac{(R_c a + R_r) R_r^2 r_r}{E_r J_r [(R_r - R_c)(\beta b + c) + (1+a)(1+\beta)]}$$

$$A_3 = \frac{(1+a) R_r^2 r_r^2}{E_r J_r [(R_r - R_c)(\beta b + c) + (1+a)(1+\beta)]}$$

式(23)即为喷层与围岩承载复合曲梁的径向位移应满足的控制微分方程。

当隧道开挖后，不施作喷层支护，式(23)将蜕化为仅有围岩承担外荷载的单层均质曲梁的径向位移的控制微分方程：

$$\frac{d^5 v}{d\theta^5} + 2 \frac{d^3 v}{d\theta^3} + \frac{dv}{d\theta} = \\ \frac{R_r^2 r_r (r_r - R_r)}{E_r J_r} \frac{d^2 q_t}{d\theta^2} + \frac{R_r^3 r_r}{E_r J_r} \frac{dq_r}{d\theta} + \frac{R_r^2 r_r^2}{E_r J_r} q_t \quad (24)$$

3.3 围岩-喷层复合曲梁的内力及其界面应力求解

微分方程式(23)的解由其方程式左边的齐次微分方程的通解 v_0 和方程式右边的特解 v^* 构成。

$$v = v_0 + v^* \quad (25)$$

根据五阶微分方程的相关求解可得：

$$v_0 = C_1 + C_2 \cos \theta + C_3 \sin \theta + C_4 \theta \cos \theta + C_5 \theta \sin \theta \quad (26)$$

其中 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 为积分常数；而特解 v^* 的具体参数形式与围岩承载曲梁结构上的荷载分布状态有关，即 q_t, q_r 具体形式有关，一旦围岩荷载分布形式确定，即可通过微分算子法确定 v^* 的相关系数。

$$v = C_1 + C_2 \cos \theta + C_3 \sin \theta + C_4 \theta \cos \theta + C_5 \theta \sin \theta + v^* \quad (27)$$

由式(12)、(18)、(24)，得

$$M_c = -\frac{E_c J_r}{R_c^2} (C_1 - 2C_4 \sin \theta + 2C_5 \cos \theta + v^* + \frac{d^2 v^*}{d\theta^2}) \quad (28)$$

$$M_r = -\frac{E_r J_r}{R_r^2} (C_1 - 2C_4 \sin \theta + 2C_5 \cos \theta + v^* + \frac{d^2 v^*}{d\theta^2}) \quad (29)$$

对式(20)等式两边作关于 θ 的一阶导数有：

$$dN_c - adN_r = (\beta b + c)dM_r \quad (30)$$

联立式(3)、(6)、(21)、(30)，有

$$\frac{dN_c}{d\theta} = \frac{[a(\beta + 1) + R_r(\beta b + c)] \frac{dM_r}{d\theta} + ar_r^2 q_t}{R_r + R_c a} \quad (31)$$

$$\frac{dN_r}{d\theta} = \frac{[(\beta+1) - R_c(\beta b + c)] \frac{dM_r}{d\theta} + r_r^2 q_t}{R_r + R_c a} \quad (32)$$

式(31)、(32)分别对 θ 积分后, 并考虑式(20):

$$N_c = \frac{[a(\beta+1) + R_r(\beta b + c)] M_r + ar_r^2 \int q_t d\theta}{R_r + R_c a} + aC_6 \quad (33)$$

$$N_r = \frac{[(\beta+1) - R_c(\beta b + c)] M_r + r_r^2 \int q_t d\theta}{R_r + R_c a} + C_6 \quad (34)$$

式中 C_6 为积分常数。

显然复合曲梁上围岩与喷层各自表面切向正应力的计算公式为:

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} - \frac{M_i}{R_i A_i} + \frac{M_i}{J_i} \cdot \frac{\frac{h_i}{2}}{1 - \frac{h_i}{2R_i}} \quad (35)$$

式中 $i = c, r$ 。

将式(33)代入式(11), 并对 θ 积分后, 得:

$$u_c = (1-m) \int v d\theta - m \frac{dv}{d\theta} + \frac{R_r r_r^2 a \int q_t d\theta d\theta}{(R_c a + R_r) E_c A_c} + \frac{R_c a}{E_c A_c} C_6 \theta + C_7 \quad (36)$$

其中 $m = \frac{R_c a - R_r \beta + R_c R_r (\beta b + c)}{R_r^2 (R_c a + R_r) E_c A_c} E_r J_r$, C_7 为积分常数。

当联立式(3)、(31)或者式(6)、(32), 可得喷层与围岩承载界面上的剪应力:

$$\tau = \frac{[R_c a - R_r \beta + R_r R_c (\beta b + c)] \frac{dM_r}{d\theta} + R_c a r_r^2 q_t}{r_r^2 (R_c a + R_r)} \quad (37)$$

联立式(2)、(31)、(37), 有:

$$Q_c = \frac{r_c a (\beta+1) - R_c a + R_r \beta + (r_r R_r - R_c R_r) (\beta b + c)}{r_c (R_c a + R_r)} \times \frac{dM_r}{d\theta} + \frac{ar_r^2 (r_c - R_c)}{r_c (R_c a + R_r)} q_t \quad (38)$$

联立式(5)、(32)、(37), 有:

$$Q_r = \frac{r_c (\beta+1) + (R_c a - R_r \beta) + R_c (R_r - r_c) (\beta b + c)}{r_c (R_c a + R_r)} \times \frac{dM_r}{d\theta} + \frac{r_r r_c (r_r - R_r) + R_c r_r a (r_r - r_c)}{r_c (R_c a + R_r)} q_t \quad (39)$$

当联立式(1)、(38)或者式(4)、(39), 可得喷层与围岩承载界面上的径向正应力:

$$\begin{aligned} \sigma = & - \frac{r_c a (\beta+1) - R_c a + R_r \beta + R_r (r_c - R_c) (\beta b + c)}{r_c (R_c a + R_r)} \times \\ & \frac{d^2 M_r}{d^2 \theta} - \frac{[a(\beta+1) + R_r (\beta b + c)] M_r}{R_r + R_c a} - \frac{ar_r^2 (r_c - R_c)}{r_c (R_c a + R_r)} \times \\ & \frac{dq_t}{d\theta} - \frac{ar_r^2 \int q_t d\theta}{R_r + R_c a} - \frac{a C_6}{r_c} \end{aligned} \quad (40)$$

式(37)、(40)即为在不同荷载作用下喷层与围岩界面上的切向剪应力和径向正应力。显然由上述解析式, 可分析任意边界条件下的围岩-喷层支护的组合拱的力学问题。

3.4 特定围岩压力作用的内力及其界面应力的求解

为进一步分析喷层与围岩承载复合结构的受力特性, 显然应确定作用在隧道围岩-喷层复合承载结构上的荷载, 当荷载结构如图 3 所示时, p 为径向均布荷载, 即 $q_t = 0$ 、 $q_r = p$, 故式(23)改写为:

$$\frac{d^5 v}{d\theta^5} + 2 \frac{d^3 v}{d\theta^3} + \frac{dv}{d\theta} = 0 \quad (41)$$

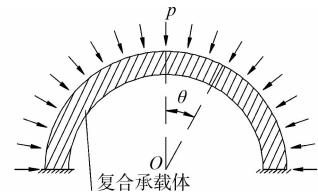


图 3 隧道复合承载体的荷载

又因隧道荷载分布及断面形状关于竖轴轴线对称, 有: $v(\theta) = v(-\theta)$, 将此条件代入式(41), 化简:

$$v = C_1 + C_2 \cos \theta + C_5 \theta \sin \theta \quad (42)$$

$$\frac{dv}{d\theta} = -C_2 \sin \theta + C_5 (\sin \theta + \theta \cos \theta) \quad (43)$$

$$M_r = -\frac{E_r J_r}{R_r^2} (C_1 + 2C_5 \cos \theta) \quad (44)$$

$$u_c = C_1 (1-m) \theta + C_2 \sin \theta + C_5 [(1-2m) \sin \theta - \theta \cos \theta] + C_6 \frac{R_c a}{E_c A_c} \theta + C_7 \quad (45)$$

根据图示结构及荷载分布, 易求得两端的支座反力为 pr_r , 考虑单元体荷载正向, 有 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时, 有 $N = -pr_r$, 此处的 N 应为复合结构的截面上的 N_r 与 N_c 的合力, 联立式(33)、(34), 有

$$-\frac{r_r}{A_2} C_1 + (a+1) C_6 = -pr_r \quad (46)$$

现考虑位移边界条件, 当 $\theta = 0$ 时, $u_c = 0$, 将此条件代入式(45), 可得:

$$C_7 = 0 \quad (47)$$

由于复合承载结构支座为固端, 因此当 $\theta = \frac{\pi}{2}$

时,有 $v = 0$, $\frac{dv}{d\theta} = 0$, $u_c = 0$, 将上述条件分别代入式(39)、(40)、(42),并结合式(43)、(44),可构建含有 C_1 、 C_2 、 C_5 、 C_6 的线性方程组,写为矩阵形式,如式(48)。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\pi}{2} & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ \frac{-r_r}{A_2} & 0 & 0 & a+1 \\ \frac{\pi(1-m)}{2} & 1 & 1-2m & \frac{\pi R_c a}{2E_c A_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -pr_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

将求得的 C_1 、 C_2 、 C_5 、 C_6 代入相关解析式即得到喷层与围岩的界面应力以及相关内力分布。

4 算例分析

选取重庆地区某山区公路隧道进行分析,该隧道在深埋段采取上下台阶法施工,上台阶在开挖后断面近似于半圆形,如图 4 所示;初期支护和围岩组合拱将共同承担围岩压力,荷载简化图如图 3。

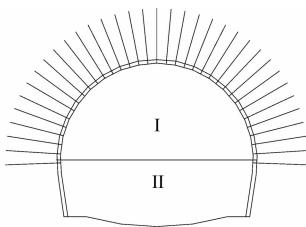


图 4 隧道台阶法开挖断面示意图

现取单位长度的复合曲梁进行计算分析,隧道初期支护计算参数取值为喷层厚度 $h_c = 20$ cm,以锚杆加固区域为围岩承载拱厚度,即 $h_r = 2$ m,隧道开挖半径即围岩与喷层接触界面距中心点距离 $r_c = 5.5$ m,则喷层中心半径 $R_c = 5.4$ m,隧道围岩拱轴线中心半径 $R_r = 6.5$ m,围岩承载拱的外半径为 $r_r = 7.5$ m,喷砼 C20 其弹性模量 E_c 为 25 GPa,围岩弹性模量 E_r 为 10 GPa;该隧道埋深 $H = 60$ m,岩石 $\gamma = 22$ kN/m³,假定开挖荷载释放 40% 时施作初期支护,通过前面建立的模型计算围岩组合拱在最终状态(荷载完全释放)下的内力分布;因此可计算得作用在围岩承载拱上的围岩荷载为 $P = 800$ kN/m,将上述参数带入相关解析式,求得: $C_1 = 0.00729$, $C_2 = -0.00464$, $C_5 = -0.00464$, $C_6 = -455524.8$ 。

将求得的积分常数代入相关解析式,可求得围岩与喷层界面应力分布和它们各自的内力分布。

根据以上绘制的内力分布图(图 5~9),反映出径向压力作用下围岩-喷层复合承载系统在台阶法开挖后,拱脚处的应力偏大,在施工中应加强支护和重点监测;同时由界面经向应力分布(图 6),喷层与围岩界面径向正应力的最大值不超过 1 MPa 并位于拱脚处,与规范^[16]中喷层与围岩粘结正应力的最大值 0.8 MPa 相比,在拱脚部分应采取加固措施;由图 5 可知喷层与围岩界面径向剪应力的最大值不超过 0.17 MPa。

承载系统喷层弯矩与围岩相比很小(图 7~8),说明围岩承担大部分荷载,是围岩-支护系统中主要承载部分;从喷层和围岩各自内缘表面切向正应力(图 9)反映出,喷层通过界面粘结使围岩从其与喷层接触面开始逐渐向围岩内部传递应力,使围岩由开挖表面逐渐向内部传递压应力,从卸荷岩体力学的观点,将有利于围岩的稳定。

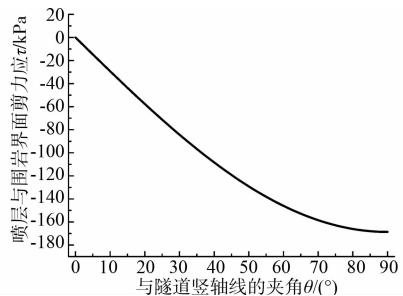


图 5 喷层与围岩界面剪应力分布

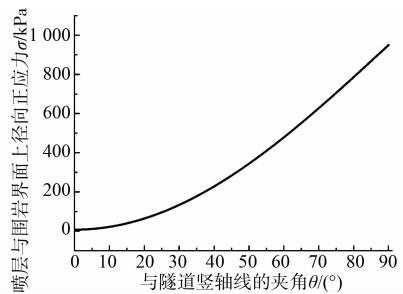


图 6 喷层与围岩界面径向应力分布

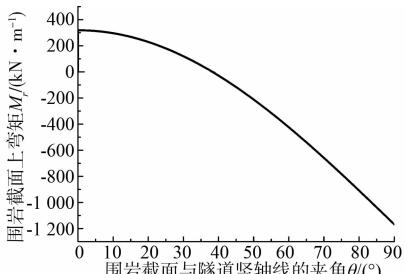


图 7 围岩承压拱弯矩图

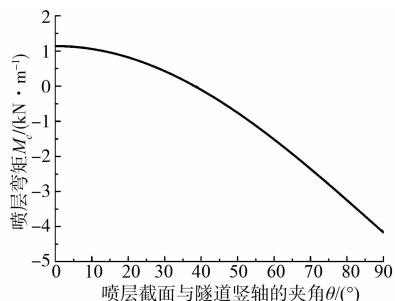


图 8 喷层弯矩图

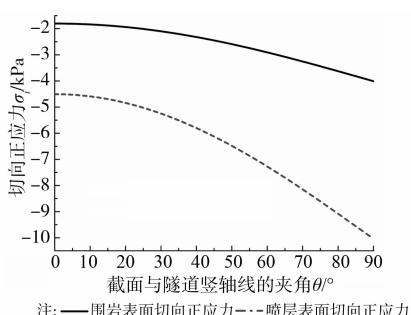


图 9 喷层与围岩各自表面切向应力图

同时在该隧道进行了喷层与围岩接触应力的监测,现将该断面的监测值与相关位置的计算值比较如表 1。

表 1 喷层与围岩接触应力计算值与监测值的结果

测点与隧道中心连线的 竖向夹角 $\theta_i / {}^\circ$	量测的接触应力 σ / kPa	计算的接触应力 σ / kPa
30	151	134
60	521	479
90	847	950

从表 1 可知,计算的接触应力值与监测值在数值上差别不大,说明计算值较为可靠。

5 结 论

通过分析隧道初期支护中喷射混凝土加固围岩的力学特点,将喷层与一定范围内的围岩考虑为复合曲梁,运用复合曲梁理论,推导了喷层与围岩界面径向应力、剪应力和围岩-喷层复合曲梁结构的内力解析公式,并通过工程算例分析,得出以下结论:

1) 应用复合曲梁理论,推导在任意分布荷载作用下隧道喷层与围岩界面应力解析表达式,并经台阶法开挖的隧道工程分析表明,该方法计算结果能直接反映喷层与围岩界面应力状态,可迅速判别喷层支护的安全状况。

2) 提出的解析计算方法既适用于分析台阶法施工的未封闭成环的初期支护,同时也可推广到全断

面法施工的初期支护,能快速估算围岩以及初期支护结构的薄弱部位,为施工过程安全决策提供依据和技术支持。

3) 算例显示,在围岩压力作用下围岩-支护系统中围岩将承担主要的弯矩,喷层的重要作用是从与围岩粘结的接触界面上开始传递应力,使围岩内部形成压应力带,有利于围岩的稳定和支护的安全。同时由计算的理论值与该断面的喷层与围岩接触应力的监测值差别不大,说明该方法较为可靠。

参 考 文 献:

- [1] 李晓红. 隧道新奥法及其监控量测[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 关宝树. 隧道及地下工程喷混凝土支护技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [3] 颜永第. 喷射混凝土最佳喷速及一次喷层厚度的理论解[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 105-108.
YAN Yongdi. Theoretical solution of optimum jet velocity and layer thickness of once gunited concrete [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 105-108.
- [4] Malmgren L, Nordlund E, Rolund S. Adhesion strength and shrinkage of shotcrete [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 33-48.
- [5] Carranza T C, Diederichs M. Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24: 506-532.
- [6] 常燕庭. 喷射混凝土早期材料性质对支护效果的影响[J]. 长江科学院院报, 1992, 9(3): 8-16.
CHANG Yanting. The influences of the early age properties of shotcrete on tunnel lining [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1992, 9(3): 8-16.
- [7] 宋德彰. 射混凝土支护对隧洞围岩的力学效应[J]. 同济大学学报, 1992, 20(3): 257-262.
SONG Dezhong. Mechanical effects of shotcrete support on tunnel-surrounding-rock mass [J]. Journal of Tongji University, 1992, 20(3): 257-262.
- [8] 付成华, 周洪波, 陈胜宏. 混凝土喷层支护节理岩体等效力学模型及其应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1967-1973.
FU Chenghua, ZHOU Hongbo, CHEN Shenghong. Equivalent mechanical model of joined rockmass reinforced by shotcrete lining and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1967-1973.
- [9] 徐军, 郑颖人, 刘东升. 锚喷支护喷层结构的目标可靠指

- 标和分项系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 671-674.
- XU Jun, ZHENG Yingren, LIU Dongsheng. Research on object reliability index and partial coefficient of bolt-shotcrete lining for tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 671-674.
- [10] 文竟舟, 张永兴, 王成. 基于接触应力反分析的隧道初期支护结构内力研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2467-2472.
- WEN Jingzhou, ZHANG Yongxing, WANG Cheng. Back analysis for internal force of initial support in tunnel engineering based on touch stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2467-2472.
- [11] 宋宏伟, 牟彬善. 破裂岩石锚固组合拱承载能力及其合理厚度探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(2): 33-36.
- SONG Hongwei, MOU Binshan. Research on load capability and rational thickness of a reinforced broken rock arch [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1997, 26(2): 33-36.
- [12] 徐金海, 石炳华, 王云海. 锚固体强度与组合拱承载能力的研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(5): 481-83.
- XU Jinhai, SHI Binghua, WANG Yunhai. Research on strength of reinforced unit and bearing capability of
- broken rock arch and its application [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(5): 481-483.
- [13] 余伟健, 高谦, 朱川曲. 深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2134-2142.
- YU Weijian, GAO Qian, ZHU Chuanqu. Study on strength theory and application of overlap arch bearing body for deep soft surrounding rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2134-2142.
- [14] 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 Mingxin, YANG Chengyong, ZHANG Qiang. Assessment on the safety of shotcrete lining during tunnel construction [J]. Journal of Beijing of JiaoTong University, 2008, 32(1): 1-6.
- [15] 祝云华. 钢纤维喷射混凝土力学特性及其在隧道单层衬砌中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 78-81.
- [16] 刘鸿文. 高等材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [17] 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.

(编辑 王秀玲)

更正启事

《土木建筑与环境工程》2012年第5期第92页,基金项目更正为:江苏省六大人才高峰基金(09-F1-004);淮安市科技支撑计划(工业项目)(HAG2012049);第95页图6更正为:

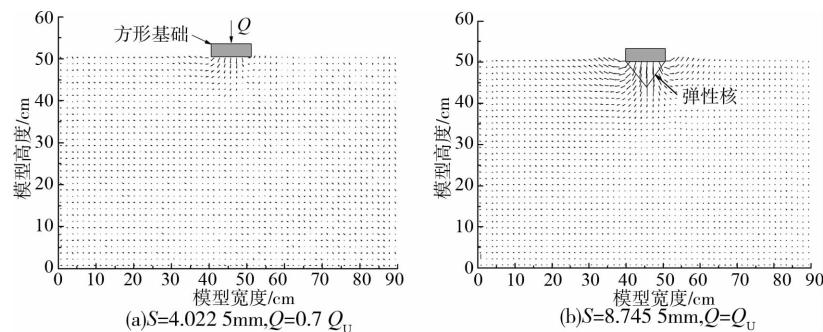


图6 方形基础下土体位移场