

文章编号: 1000-7598 (2011) 04-1062-07

隧道单层衬砌设计方法研究及应用

龚彦峰^{1,2}, 张俊儒³

(1. 北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063;
3. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 目前, 在单层衬砌设计中应用较为广泛的是基于挪威法的 Q 系统支护设计法, 但该方法涉及的参数有 6 个, 在施工前及施工过程中测试这些参数经验性较强, 准确性不高, 而且费用较高; 将 Q 法直接移植到中国的单层衬砌设计困难较大, 不适合中国国情。在此背景下, 提出以屈服接近度和围岩松动圈支护理论为基础的单层衬砌设计原则和方法, 并结合合武铁路大别山隧道 2 号斜井进行了工程实践。首先通过地质勘查得到隧道所在地区的工程地质、水文地质特征以及围岩的物理力学指标, 确定隧道围岩的屈服接近度, 进而提出单层衬砌支护参数及喷射混凝土的力学控制指标, 完成结构的预设计; 根据隧道施工过程中实测的围岩松动圈范围, 运用松动圈支护理论修正设计, 从而形成一套完整的单层衬砌设计方法体系。实践表明, 提出的单层衬砌设计方法经济适用、对施工干扰小, 适合信息化施工, 且施作完成的单层衬砌结构安全可靠, 具有显著的经济效益和社会效益, 有较大的推广前景。

关 键 词: 隧道; 单层衬砌; 设计方法; 屈服接近度; 围岩松动圈
中图分类号: U 452.2 **文献标识码:** A

Study of design methodology and application of tunnel single layer lining

GONG Yan-feng^{1,2}, ZHANG Jun-ru³

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: At present, the Q system supporting design method based on Norwegian tunneling method is widely used in single layer lining, but this method involving 6 parameters, which can't be tested accuracy before or during construction and the testing cost is high. So the Q system supporting design method is not suit for China's single layer lining design. At this background, the design principle and design methodology for single layer lining based on yield approach index and the support theory based on broken rock zone are put forward; and the engineering practice combining with Dabieshan tunnel inclined shafts No.2 on the Hefei-Wuhan railway is executive too. During the research, engineering condition, hydrogeology condition and physico-mechanical indices of surrounding rock where the tunnel located must be got by geological prospecting at first; then the supporting parameters of single layer lining and mechanical index for shotcrete is presented which will form the structure's pre-design. During the actual process of construction, according to the broken rock zone range which is field tested and then use support theory based on broken rock zone to modify the design, a complete single layer lining design system will form. The practice shows that the design method of single layer lining proposed is economical and applicable; and the interference for construction is low which suits information construction. On the other hand, the single layer lining structure completed is safe and reliable, and it will make notable economic and social benefits in engineering application; it is worthwhile to be popularized.

Key words: tunnel; single layer lining; design methodology; yield approach index; broken rock zone

1 引 言

单层衬砌 (single layer lining) 是 20 世纪 70 年代发展起来的一种隧道支护体系。随着喷射混凝土施工工艺、质量性能的提高, 其技术得到了迅速地

发展。在国外, 对于单层衬砌, 挪威、瑞典、日本、美国、加拿大、芬兰、比利时以及西班牙等国家都有应用, 特别在挪威、瑞典应用较为普遍, 其范围包括地铁车站、地铁区间、铁路 (见图 1)、公路 (见图 2)、水工隧道、地下酒窖以及地下体育馆等^[1-2]。

收稿日期: 2009-12-14

基金项目: 铁道部科技研究开发项目 (No. 2003G038)。

第一作者简介: 龚彦峰, 男, 1969 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事隧道及地下工程的设计及研究工作。E-mail: tsygyf@126.com

而在国内单层衬砌应用还比较少见。



图1 铁路隧道(组合钢架)

Fig.1 Railway tunnel (combination steel frame)



图2 公路隧道

Fig.2 Highway tunnel

对单层衬砌设计方法,目前应用较为广泛的是基于挪威法的Q系统支护设计法,设计依据为Barton等2004年提出的基于Q系统法的岩石支护设计诺谟图。进行单层衬砌支护设计时,根据隧道的当量跨度或高度(DE)、岩石质量指标(Q值)和一定的安全等级(ESR),可以从设计诺谟图中得出所需的支护方式和数量^[3-5]。

但Q系统围岩评价法涉及的参数有6个之多,在施工前测试这些参数需花费大量的人力、物力,而且经验性较强;在施工过程中,也很难准确测试这几个参数,因此,将此方法直接移植到中国的单层衬砌设计,还是有一定困难的,不适合中国国情。在此背景下,本文就单层衬砌设计方法,引入屈服接近度和围岩松动圈支护理论对洞室围岩稳定性进行评价,从而进行分级,完成隧道单层衬砌的设计。

2 设计基本理论

2.1 屈服接近度

屈服接近度YAI(yield approach index)广义的表述为:描述一点的现时状态与相对最安全状态的参量的比, $YAI \in [0, 1]$ 。相对于某一强度理论则可定义为:空间应力状态下的一点沿最不利应力路径到屈服面的距离与相应的最稳定参考点在相同罗德角方向上沿最不利应力路径到屈服面的距离之比^[6-7]。屈服接近度将力学概念与几何特点结合起来,表述清晰、简单实用,并且能够比较全面客观

地表述围岩的危险性程度,因此,本文将引入屈服接近度的概念来对毛洞稳定性进行分级。

2.1.1 毛洞稳定性的屈服接近度分析

在岩土力学中,目前应用最广泛的强度准则是Mohr-Coulomb准则和Drucker-Prager准则。

对于Mohr-Coulomb准则,在 σ - τ 组成的二维平面内,Coulomb强度直线与某一点的应力圆的相对关系如图3所示。

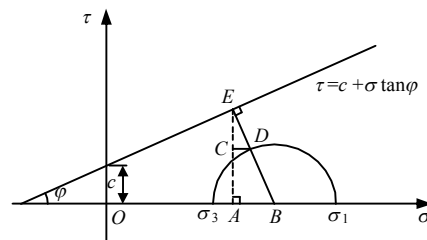


图3 Mohr-Coulomb 屈服条件

Fig.3 Mohr-Coulomb yield condition

假设D点的坐标为 (σ_n, τ_n) ,E点的坐标为 (σ, τ) ,根据屈服接近度的定义即可确定其屈服接近度函数。

当剪切破坏时,

$$YAI = \frac{ED}{EB} = \frac{EC}{EA} = \frac{\tau - \tau_n}{\tau} = 1 - \frac{\tau_n}{\tau} \quad (1)$$

$$\text{式中: } \tau = c + \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)c \tan \varphi - 2c}{2(\tan \varphi + c \tan \varphi)} \tan \varphi;$$

$$\tau_n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi}{2};$$

因此,

$$YAI = 1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi} \quad (2)$$

当拉伸破坏时,

$$YAI = \frac{2(\sigma_3 - \sigma_1)}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_1} \quad (3)$$

显然,当屈服接近度 $YAI = 0$ 时,应力点在屈服面上,发生屈服;当 $YAI = 1$ 时,应力点处于相对最安全状态。

对于Drucker-Prager准则,当 $\varphi > 0$ 时,Drucker-Prager准则屈服面在主应力空间是内切于Mohr-Coulomb屈服面的一个圆锥面,主应力空间中任一点D与屈服面的相对关系如图4所示。

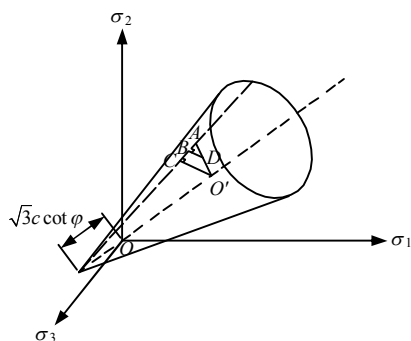
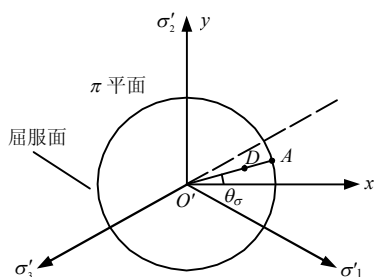


图 4 主应力空间中应力点与屈服面的关系

Fig.4 Relationship between stress point in principal stress space and yield plane

在 π 平面上, 应力点 D 与屈服面的相对关系如图 5 所示, 其中, O' 点坐标为 $(\sigma_\pi, 0)$, D 点坐标为 (σ_π, τ_π) , A 点坐标为 (σ_π, τ'_π) 。于是, 线段 $O'D$ 的长度为 τ_π , 线段 $O'A$ 的长度为 τ'_π 。

图 5 π 平面上应力点与屈服线的关系Fig.5 Relationship between stress point in π plane and yield line

其中: $\sigma_\pi = I_1 / \sqrt{3}$, $\tau_\pi = \sqrt{2J_2}$, I_1 为应力张量第一不变量, J_2 为应力偏量第二不变量。而点 $A(\sigma_\pi, \tau'_\pi)$ 位于屈服面上, 将其坐标代入 Drucker-Prager 准则表达式可得

$$\sqrt{3}\alpha\sigma_\pi + \sqrt{2}\tau_\pi / 2 = k \quad (4)$$

解 τ'_π 可得

$$\tau'_\pi = \sqrt{2}k - \sqrt{2}\alpha I_1 \quad (5)$$

根据屈服接近度的定义, 在子午面内即可建立 Drucker-Prager 准则的屈服接近度函数, 如图 6 所示。则:

$$YAI = \frac{DB}{O'C} = \frac{DA}{O'A} = \frac{\tau'_\pi - \tau_\pi}{\tau'_\pi} = 1 - \frac{\sqrt{2}J_2}{\sqrt{2}k - \sqrt{2}\alpha I_1} = \frac{k - \alpha I_1 - \sqrt{J_2}}{k - \alpha I_1} \quad (6)$$

式中:

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}, \quad k = \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$$

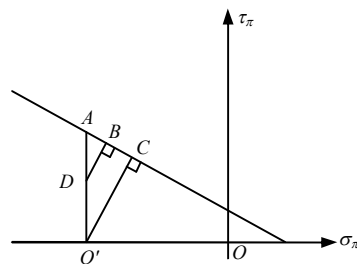


图 6 子午面上应力点与子午线的关系

Fig.6 Relationship between stress point in meridian plane and meridian line

2.1.2 基于屈服接近度的毛洞稳定性分级

基于屈服接近度的毛洞稳定性分级如表 1 所示, 用其分级的主要理论依据如下:

(1) 利用复杂应力状态下的应力分量进行表述, 可全面客观地反应围岩的实际状态; 同时将力学概念与几何特点结合起来, 表述清楚, 简单实用。

(2) 围岩中未发生屈服的点并不表示其安全程度是一样的, 相同的应力水平 (即在同一 π 平面内) 下, 屈服点的安全程度也是有差别的, 而屈服接近度则可合理地表达这种差别, 分析比较接近实际情况。

(3) 在预设计阶段, 通过理论分析和数值模拟手段, 不仅可得到塑性区分布范围, 还可通过屈服接近度分析确定塑性区之外区域的应力集中程度的分区, 表达了其应力危险性; 同时可预估未来的开挖扰动所引起的屈服接近度的变化, 为工程施工中评判开挖扰动的影响, 预估各区域发展的部位、深度、方向提供依据。

表 1 基于屈服接近度的毛洞稳定性分级

Table 1 Hole stability classification based on yield approach index

屈服接近度	毛洞稳定性分级	稳定性特征	支护措施
$YAI > 0.2$	充分稳定	洞室有足够的自稳能力和支护能力; 无坍塌。	饰面支护或防护支护
$0 < YAI \leq 0.2$	稳定	暴露时间长, 洞室可能会出现局部小坍塌, 侧壁稳定。	构造支护
	临界稳定	拱部无支护可产生小坍塌, 侧壁基本稳定。	轻型承载支护
	$\Delta R \leq 2 \text{ m}$	拱部无支护时, 可产生较大的坍塌, 侧壁有时失去稳定。	喷锚支护, 并采用全封闭支护体系。
	$2 \text{ m} < \Delta R \leq 3 \text{ m}$	围岩易坍塌, 处理不当会出现大坍塌, 侧壁经常小坍塌; 浅埋时易出现地表下沉或塌至地表。	辅以前支护, 加强型喷锚支护, 并采用全封闭支护体系。
$YAI = 0$	不稳定		
	$\Delta R > 3 \text{ m}$	围岩极易坍塌, 洞室无自支护能力, 浅埋时易塌至地表。	辅以前支护及地层加固, 加强型喷锚支护, 并采用全封闭支护体系。

注: 表中 ΔR 代表塑性区厚度。

2.2 围岩松动圈支护理论

围岩松动圈支护理论的立论有3点:①围岩松动圈是隧道开挖后客观存在和普遍存在的;②阐明支护对象为松动破裂发展中的岩石碎胀变形或碎胀力;③支护的作用一方面是维护破裂的岩石在原位不垮落,另一方面是限制围岩松动圈形成过程中的有害变形。

2.2.1 围岩松动圈稳定性判据

采用围岩松动圈厚度值来判断围岩的稳定程度,其理论依据如下^[8-9]:

(1)围岩松动圈的大小 L_p 是地应力 P 和围岩强度 R 的函数, $L_p = f(P, R)$ 。即松动圈是地应力与围岩强度的相互作用结果,是一个综合指标。

(2)松动圈越大,围岩收敛变形量越大、支护越困难,反之则易。松动圈的大小反映了支护的困难程度。

(3)支护能有限地限制围岩的碎胀变形,但不能明显地阻止松动圈的发展,因此,支护对松动圈的影响工程上可不予考虑。

2.2.2 围岩松动圈分类

围岩松动圈的大小是岩体强度、地应力、岩体性质以及洞室跨度等因素的综合体现,反映了隧道洞室围岩的整体稳定状态,因此,本文在文献[8]围岩松动圈分类表研究的基础上,将松动圈支护理论引入铁路隧道围岩分级。表2为基于松动圈支护理论的200 km/h双线高速铁路隧道围岩分级表,按围岩松动圈的大小共分为3大类5小级,对于大变形、膨胀性围岩以及多年冻土等特殊岩土,不属于本围岩分级表讨论的范畴,需进行特殊处理。

表2 基于围岩松动圈支护理论的200 km/h双线高速铁路隧道围岩分级

Table 2 Surrounding rock classification in high-speed double-track railway tunnel with speed of 200 km/h based on broken rock zone support theory

松动圈	围岩 分级	L_p /cm	围岩稳定 状态	支护机制及方法	备注
小松 动圈	I	0~30	充分稳定 围岩	喷射混凝土饰面 支护或防护支护	洞室有足够 的自稳能力
	II	30~80	稳定围岩	喷射混凝土的局 部支护机制及单 体锚杆支护机制	暴露时间长,洞 室可能出现局部 小坍塌
中松 动圈	III	80~120	较稳定 围岩	群锚悬吊支护机 制及喷射混凝土 的整体支护机制	拱部无支护时 可产生小坍塌
	IV	120~180	一般围岩	群锚组合拱支护 机制及喷射混凝土 的整体支护机制	无支护时洞室可 产生较大坍塌
大松 动圈	V	180~250	一般不稳定围 岩(软岩)	群锚组合拱支护 机制及喷射混凝土 的整体支护机制	围岩易坍塌,处 理不当会出现塌 塌,施工时辅 以超前支护

3 单层衬砌的设计原则

隧道单层衬砌设计原则可表述为:首先通过勘测掌握隧道场区的工程地质、水文地质特征,并实测得到围岩的物理力学指标;然后通过计算确定围岩的屈服接近度,并以此为依据进行围岩分级,提出预设计阶段的支护参数,同时给出喷射混凝土的力学控制指标;根据隧道施工阶段实测的围岩松动圈大小进行围岩稳定性评价,如与预设计相符可继续施工,否则重新进行围岩分级,并修正设计。具体设计流程如图7所示。

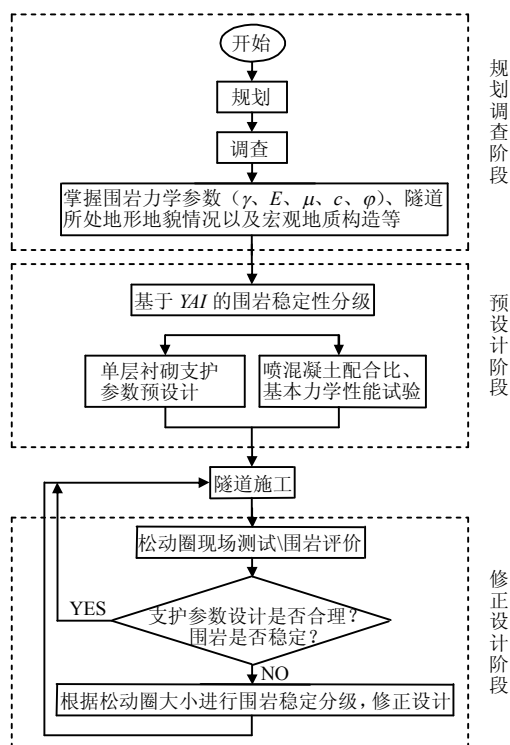


图7 隧道单层衬砌3阶段设计流程

Fig.7 Three stages design flowchart of single layer lining

4 工程应用实例

4.1 工点简介

合武铁路大别山隧道全长13.256 km,2号斜井位于线路前进方向右侧,斜井与隧道交于DK221+450处,平面与线路交角为18°,车道中线与隧道中线正交,纵坡坡比为8.2%,斜井斜长1 077 m。

斜井洞身地段,在X2DK0+110~X2DK0+130范围内有一组节理密集带,节理产状为120°∠80°,岩体较破碎,石质坚硬,裂隙水稍发育;其余地段均为二长花岗岩,中细粒花岗结构,块状构造,岩体较完整,石质坚硬、性脆,局部节理较发育,地下水为基岩裂隙水,不发育。

该斜井为双车道无轨运输斜井，衬砌断面内轮廓底宽为 7.6 m，净高为 5.88 m，X2DK0+000~X2DK0+480 段按单层衬砌的技术要求进行设计、施工。

4.2 单层衬砌支护预设计

4.2.1 基于屈服接近度的围岩稳定性分析

围岩的物理力学指标见表 3，计算时屈服准则采用 Drucker-Prager 准则。

表 3 围岩物理力学指标

桩号	弹性模量	泊松比	重度 γ	黏聚力	内摩擦角
	E/GPa	μ	$/(kN/m^3)$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
X2DK0+000~X2DK0+100	20.0	0.25	25	1.5	50
X2DK0+140~X2DK0+480					
X2DK0+100~X2DK0+140	1.3	0.35	20	0.2	27

(1) X2DK0+000~X2DK0+100 及 X2DK0+140~X2DK0+480 段围岩洞室稳定性分析

通过有限元分析，得出如图 8 所示的屈服接近度等值线图，图中显示：除了在边墙局部有 $0 < YAI < 0.2$ 外，其余部位 $YAI \geq 0.2$ ，根据毛洞稳定性分级可知，围岩处于稳定与充分稳定之间，说明洞室有一定的自稳能力和自支护能力，进行必要的构造支护即可。

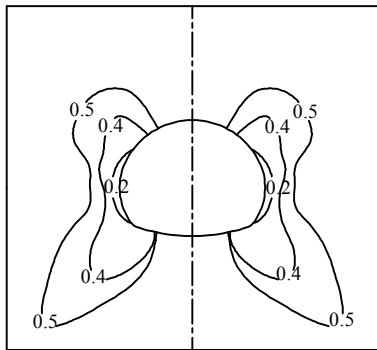


图 8 II级屈服接近度等值线

Fig.8 Yield approach index contours of grade II

(2) X2DK0+100~+140 段围岩洞室稳定性分析
通过有限元分析，得出如图 9 所示的屈服接近度等值线图，图中显示： $YAI = 0$ 所包含的区域，即塑性区的范围约为 1.6 m，之外的区域屈服接近度逐渐增大。根据毛洞稳定性分级可知，围岩处于不稳定状态，且 $\Delta R \leq 2$ m，拱部无支护时可产生较大坍塌，侧壁有时也失去稳定，因此，需要喷锚全封闭进行支护。

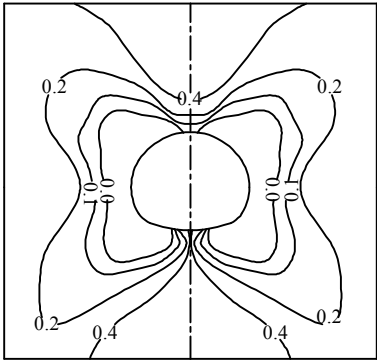


图 9 IV级屈服接近度等值线

Fig.9 Yield approach index contours of grade IV

4.2.2 单层衬砌支护参数

根据上述分析，在预设计阶段，单层衬砌的支护参数如表 4 所示。

表 4 单层衬砌支护参数

桩号	锚杆	喷射混凝土 (标号为 C25)	补强空间 /cm
X2DK0+000~X2DK0+100 及 X2DK0+140~X2DK0+480	局部设置随机砂浆锚杆，直径为 22 mm，长度为 1.5 m； 拱墙设置系统砂浆锚杆，直径为 22 mm，长度为 2.5 m，间距 1 m×1 m，梅花型布置。	分两层喷射：第 1 层喷 4 cm 硅粉混凝土，第 2 层喷 4 cm 聚丙烯纤维硅粉混凝土； 分两层喷射：第 1 层喷 15 cm 聚丙烯纤维硅粉混凝土，第 2 层喷 10 cm 聚丙烯纤维硅粉混凝土。	10 10

4.2.3 单层衬砌喷射混凝土力学控制指标

在对喷射混凝土基准抗压强度、初期强度、黏结强度以及抗渗性能研究的基础上，结合国内外相关的工程实践^[10]，初步提出了用作单层衬砌的喷射混凝土力学性能控制指标，具体如下：①喷射混凝土 28 d 标准抗压强度大于 30 MPa；②喷射混凝土的初期强度满足图 10 的要求；③黏结抗拉强度满足：岩石与喷射混凝土之间 $f_{ts} \geq 1.2$ MPa；喷射混凝土与喷射混凝土之间 $f_{ts} \geq 1.5$ MPa；④喷射混凝土抗渗标准满足：在标准试验条件下（恒压时，即压力恒定为 (0.8 ± 0.05) MPa，时间为 24 h）渗水深度 $D \leq 7.8$ cm。

4.3 围岩松动圈现场测试及预设计修正

4.3.1 地质雷达探测法确定围岩松动圈范围

(1) 探测仪器及参数设置

围岩松动圈测试采用 RAMAC/GPR 地质雷达，考虑到围岩的整体性较好，且均为花岗岩，松动圈一般都小于 3 m，因此，选择频率为 500 MHz 的天

线,时窗开到 50 ns,结合以往的探测经验,在花岗岩中的雷达波速取 $0.12 \text{ m/ns}^{[11]}$ 。

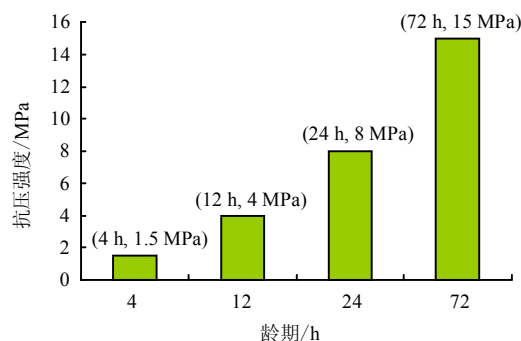


图 10 喷射混凝土的初期强度控制指标

Fig.10 Initial strength control index for shotcrete

(2) 探测规划及测线布置

结合现场施工情况,把 X2DK0+000~X2DK0+480 段分为 4 个单元进行松动圈探测,即 X2DK0+480~X2DK0+300、X2DK0+300~X2DK0+140、X2DK0+140~X2DK0+100、X2DK0+100~X2DK0+000 共 4 个单元;为全面掌握斜井的松动圈范围分布,沿斜井轴向分别在拱顶、左右拱腰、左右边墙及左右墙脚布置 7 条测线,每隔 10 m 采集 1 次数据。

(3) 松动圈雷达探测图像及探测结果

图 11 为 X2DK0+110 里程附近左墙脚测线上围岩松动圈雷达探测图像,在雷达波传播的过程中,首波反射的界面即可判定为松动圈的边界。由图可知,松动圈厚度为 55 cm。

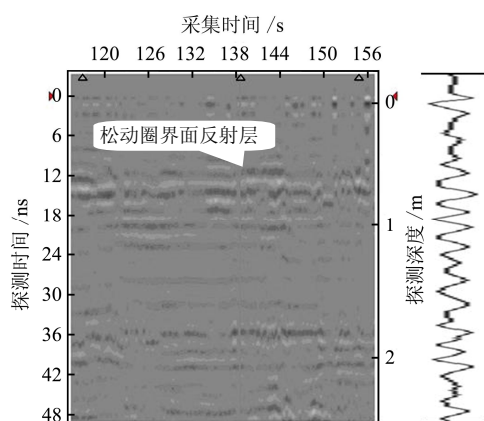


图 11 围岩松动圈雷达探测图像

Fig.11 Broken rock zone image of GPR

整个探测结果显示,松动圈厚度基本在 25~80 cm 之间,属中松动圈范围,围岩处于比较稳定的状态。

4.3.2 预设计修正

通过对 X2DK0+000~X2DK0+480 段围岩松动圈的现场探测可知,松动圈厚度基本在 25~80 cm 之间,在 X2DK0+100~X2DK0+140 段,并未出现松动圈增大的现象,都属于中松动圈。因此 X2DK0+000~X2DK0+480 段均采用同一种单层衬砌形式,即设置随机砂浆锚杆 ($\phi=22 \text{ mm}$, $l=1.5 \text{ m}$);单层衬砌分两层喷射,第 1 层喷 C25 硅粉混凝土 4 cm,第 2 层喷 C25 聚丙烯纤维硅粉混凝土 4 cm,总计厚度 8 cm;同时预留 10 cm 补强空间。

4.4 单层衬砌结构力学性能测试

为进一步掌握单层衬砌结构的受力特征,布置了 X2DK0+410、X2DK0+128 及 X2DK0+110 共 3 个断面,对围岩压力、喷射混凝土应力以及锚杆轴力进行测试。

限于篇幅,仅给出测试结果:最大围岩压力为 0.036 MPa;喷射混凝土最大压应力为 1.3 MPa;锚杆最大轴力为 7.21 kN,处于受压状态。

可以看出,围岩压力、喷射混凝土应力以及锚杆轴力的测试绝对值都很小,这主要是由于喷射混凝土在凝固过程中产生的温度应力引起的,即单层衬砌基本不承担荷载,仅作为构造支护,从而说明单层衬砌是安全可靠的。图 12 为大别山隧道 2 号斜井完成后的单层衬砌效果。



图 12 完成后的单层衬砌

Fig.12 Single layer lining completed

4.5 取得的经济效益和社会效益

X2DK0+000~X2DK0+480 段变更为单层衬砌后,与原复合式衬砌设计相比,减少了施工工序、开挖量以及衬砌圬工量等,扣除科研配合费 100 万元后总计还节约投资 116.7 万元。同时,采用单层衬砌比采用喷锚支护整体式衬砌节约了 15 个月,为大别山隧道的顺利施工奠定了基础,取得了显著的社会效益。

5 结 论

(1) 提出了采用屈服接近度指标对洞室围岩稳定性进行总体评价完成预设计, 运用松动圈支护理论修正设计的单层衬砌设计方法, 将隧道支护设计向准定量水平推进了一步, 提高了设计的准确性。

(2) 通过对喷射混凝土的性能试验, 并结合工程实践, 初步提出了用作单层衬砌的喷射混凝土力学性能控制指标。

(3) 通过现场测试手段研究了单层衬砌结构的受力特征; 测试结果表明: 单层衬砌结构承担荷载较小, 单层衬砌安全可靠。

(4) 通过在合武铁路大别山隧道 2 号斜井的工程应用实践得出: 本文提出的单层衬砌设计方法经济适用, 对施工干扰小, 适合信息化施工, 具有显著的经济效益和社会效益, 有较好的推广前景。

参 考 文 献

- [1] 张俊儒. 隧道单层衬砌作用机理及设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [2] 张俊儒, 仇文革. 隧道单层衬砌研究现状及评述[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 693—699.
ZHANG Jun-ru, QIU Wen-ge. Present status and comment of tunnel single shell lining study[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(4): 693—699.
- [3] 静天文, 江玉生, 李晓. 公路隧道围岩分类与支护优化设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [4] Norwegian Tunnelling Society. Norwegian tunnelling[M]. Sandvika: Norwegian Tunnelling Society, 2004.
- [5] 贺少辉, 马万权, 曹德胜, 等. 隧道湿喷纤维高性能混凝土单层永久衬砌研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3509—3517.
HE Shao-hui, MA Wan-quan, CAO De-sheng, et al. Permanent single-layer tunnel lining by fibre-reinforced high performance shotcrete and wet-mix method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3509—3517.
- [6] 周辉, 张传庆, 冯夏庭, 等. 隧道及地下工程围岩的屈服接近度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3083—3087.
ZHOU Hui, ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, et al. Analysis of rock mass stability in tunnel and underground engineering based on yield approach index[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3083—3087.
- [7] 张传庆. 基于破坏接近度的岩石工程安全性评价方法的研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2006.
- [8] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [9] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21—32.
DONG Fang-ting, SONG Hong-wei, GUO Zhi-hong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. **Journal of China Coal Society**, 1994, 19(1): 21—32.
- [10] The sprayed concrete technical committee. European specification for sprayed concrete[M]. Farnham, UK: EFNARC, 1996.
- [11] 宋宏伟, 王闯, 贾颖绚. 用地质雷达测试围岩松动圈的原理与实践[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(4): 370—373.
SONG Hong-wei, WANG Chuang, JIA Ying-xuan. Principle of measuring broken rock zone around underground roadway with GPR and its application[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2002, 31(4): 370—373.