

复合式衬砌结构中衬砌分担围岩压力比例的研究

孙明社¹, 马 涛², 申志军³, 吴 旭¹, 王梦恕¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;

3. 蒙西华中铁路股份有限公司, 北京 100073)

摘 要: 复合式衬砌结构中衬砌分担围岩压力的评价方法是隧道工程技术的重要研究课题之一。依托某新建铁路隧道工程, 提出了一种基于监测位移反分析评价围岩和支护应力, 进而计算初期支护和衬砌背后压力的方法。根据监测位移和衬砌施作时间, 确定初期支护的已发生变形和剩余变形。通过有限元反分析求出与已发生变形和剩余变形相对应的围岩和支护应力, 得到初期支护和衬砌背后压力。对比初期支护背后压力及衬砌背后压力的现场监测和反分析的计算结果, 两者比较一致, 说明了该方法的可行性。该新建隧道初期支护闭合 95 d 后施作衬砌, 计算得到衬砌背后压力约 0.04~0.06 MPa, 衬砌分担围岩压力比例约 13%~16%。研究成果对复合式衬砌结构的设计具有一定的参考意义。

关 键 词: 复合式衬砌; 监测位移; 位移反分析; 围岩压力; 衬砌分担围岩压力比

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 增 1-0437-09

Study of lining sharing surrounding rock pressure in composite lining structure

SUN Ming-she¹, MA Tao², SHEN Zhi-jun³, WU Xu¹, WANG Meng-shu¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China; 3. Mengxi-Huazhong Railway Co., Ltd., Beijing 100073, China)

Abstract: The evaluation method of lining sharing surrounding rock pressure in composite lining structure is one of the important research objectives in tunnel engineering. In this paper, an evaluating method of lining sharing surrounding rock pressure based on back analysis of monitoring displacements is proposed. Using the monitoring displacements and the lining casting time, the residual deformations of initial support are first determined; and then by using finite element back analysis, the stresses of surrounding rock and initial support can be obtained; therefore the both of pressures behind the initial support and the lining are calculated. In order to show the applicability of the proposed procedure, the comparison of the in-situ observed and calculated is carried out for a newly built railway tunnel in which the lining is casted after 95 days in the initial support is closed. The pressure behind the lining is calculated to be about 0.04-0.06 MPa; and the ratio of lining sharing surrounding rock pressure is about 13 %-16 %. The results show that the proposed method can be useful for the design of composite lining structures.

Keywords: composite lining structure; monitoring displacement; displacement back analysis; surrounding rock pressure; lining sharing surrounding rock pressure

1 引 言

自新奥法提出以来复合式衬砌已成为山岭隧道的主要衬砌结构类型, 但关于复合式衬砌的设计理念和方

导致隧道坍塌, 酿成灾祸。因此, 寻找一种可以确定衬砌分担围岩压力, 明确其受力特性的设计方法具有重要的工程意义。

关于初期支护和衬砌的相互作用及其分担围岩压力的大小, 国内学者开展了大量研究, 在现场试验方面, 赵子荣等^[3]研究了复合式衬砌承担围岩压力的大小及分布特征, 得出衬砌是受力的且按初期支护和衬砌的刚度分配压力。王晓彤等^[4]通过对围

收稿日期: 2018-03-20

第一作者简介: 孙明社, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面研究。E-mail: sunmingshe2012@126.com

通讯作者: 吴旭, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面研究。E-mail: wuxucd@126.com

岩内部位移和衬砌背后压力的分析,给出了各级围岩下浅埋洞室衬砌分担围岩压力比例的建议值。赵占广等^[5]通过对浅埋黄土隧道的现场监测,得出衬砌和仰拱的承载作用较小的结论。李鹏飞等^[6]通过对胡麻岭隧道的现场监测,得到大断面黄土隧道衬砌背后压力均小于 0.2 MPa,分布不对称,总体由拱顶至拱墙下部逐渐增大的特点。刘志春等^[7]分析了乌鞘岭单线隧道断层段现场监测数据,得出砌分担围岩压力比例为 33.7%,后期增长的围岩压力主要由衬砌承担。韩现民等^[8]结合洞室变形的现场监测,得出衬砌背后压力及其分担围岩压力比例随着初期支护刚度的增大而增大。杨昌贤等^[9]通过分析初期支护和衬砌背后压力监测数据,得出 IV、V 级围岩深埋段衬砌是受力的,其分担围岩压力比例约 30%~40%。何本国等^[10]针对膏溶角砾岩地层深埋隧道的现场监测,得出边墙处衬砌分担围岩压力比例比拱部大,平均比例为 50%。在理论计算方面,莫勋涛等^[11]利用 RMR 分级数据库,建立了隧道特征指标与岩体站立时间的线性关系,推出初期支护和衬砌各自承担围岩压力时的比例计算公式。王华宁等^[12]基于时效理论解,给出了圆形隧道双层衬砌围岩压力分担比例的简便计算方法,但适用于围岩未发生较大区域破坏的时效问题。此外,杨建平等^[13]通过数值模拟研究了小净距公路隧道支护时机对围岩的影响,得到及时施作衬砌可以显著控制岩柱变形,改善围岩应力状态。王迎超等^[14]通过有限元计算分析了复合式衬砌的受力规律,结果表明衬砌施作越早,其受力越大,衬砌刚度增加,其分担围岩压力也增大。这些研究成果多基于特定地质条件或隧道断面的现场监测,缺乏理论计算依据,对复合式衬砌结构设计的指导性不强。

衬砌背后压力及其分担围岩压力比例与其施作时间密切相关,衬砌施作的早衬砌背后压力及其受力大,施作的晚衬砌背后压力及其受力小。结合衬砌施作时间,本文给出一种基于位移反分析技术计算衬砌分担围岩压力比例的方法。根据监测位移数据得到衬砌施作时初期支护已发生变形及其剩余变形。利用位移反分析技术计算与初期支护已发生变形和剩余变形对应的围岩释放应力及剩余应力场,进而得到衬砌分担围岩压力比例。依托某新建铁路隧道工程,通过对比初期支护和衬砌背后压力的现场监测和反分析计算结果,两者比较一致,验证了此方法的可行性。研究成果对复合式衬砌结构设计具有一定的参考意义。

2 衬砌分担围岩压力比例计算方法

2.1 基于反分析的围岩及支护应力的求解

吴旭^[15]、中村等^[16]在樱井春辅反分析方法的基础上,提出了一种基于监测位移数据反分析围岩及支护应力的方法,并开发了相应反分析软件,基本思路是假定隧道围岩、支护的弹性参数(E 、 μ)为已知,而围岩的应力为未知,则可以利用有限元最小二乘法技术通过隧道的监测位移数据来反分析围岩及支护的应力,技术概念如图 1 所示。

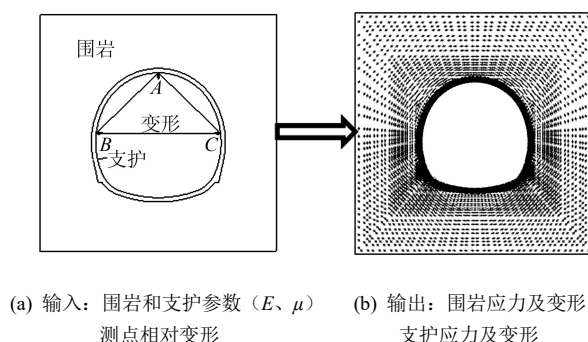


图 1 位移反分析技术概念图

Fig.1 Technical concept diagram of displacement back analysis

下文对反分析有限元计算格式进行说明。对隧道模型离散化得到有限元方程,即

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} \quad (1)$$

式中: $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\Delta u\}$ 为节点位移; $\{\Delta f\}$ 为节点力。

一般的正分析是指式(1)右边节点力已知,求解左边节点位移;反分析则为左边节点位移的一部分作为已知,求解右边节点力。这里反分析的基本思想和樱井春辅等^[17-18]相同。但是,应力场不是初始应力场,而是对应支护变形的围岩应力场。

平面问题中若已知节点位移为 Δu_i ($i=1, m$),未知节点位移为 Δu_j ($j=1, n; n=N-m, N$ 为总自由度),整理式(1)可得

$$\begin{cases} [K]_{m \times m} \{\Delta u\}_{m \times 1} + [K]_{m \times n} \{\Delta u\}_{n \times 1} = \{\Delta f\}_{m \times 1} \\ [K]_{n \times m} \{\Delta u\}_{m \times 1} + [K]_{n \times n} \{\Delta u\}_{n \times 1} = \{\Delta f\}_{n \times 1} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)第二式代入第一式,可得

$$\begin{aligned} [K]_{m \times m} \{\Delta u\}_{m \times 1} + [K]_{m \times n} [K]_{n \times n}^{-1} \cdot \\ (\{\Delta f\}_{n \times 1} - [K]_{n \times m} \{\Delta u\}_{m \times 1}) = \{\Delta f\}_{m \times 1} \end{aligned} \quad (3)$$

另一方面, 节点力 $\{\Delta f\}$ 为应力 $\{\Delta \sigma\}$ 的线性函数, 即

$$\begin{cases} \{\Delta f\}_{m \times 1} = [P]_{m \times 3} \{\Delta \sigma\}_{3 \times 1} \\ \{\Delta f\}_{n \times 1} = [Q]_{n \times 3} \{\Delta \sigma\}_{3 \times 1} \end{cases} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3), 可得

$$\{\Delta u\}_{m \times 1} = [A]_{m \times 3} \{\Delta \sigma\}_{3 \times 1} \quad (5)$$

式中:

$$[A]_{m \times 3} = \left([K]_{m \times m} - [K]_{m \times n} [K]_{n \times n}^{-1} [K]_{n \times m} \right)^{-1} \cdot \left([P]_{m \times 3} - [K]_{m \times n} [K]_{n \times n}^{-1} [Q]_{n \times 3} \right) \quad (6)$$

一般在已知 3 个以上的测点变形条件下, 利用最小二乘法技术, 即可得到与变形对应的围岩应力 $\Delta \sigma_{ij} (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$, 解式为

$$\{\Delta \sigma\}_{3 \times 1} = [A]_{m \times 3}^{-1} \{\Delta u\}_{m \times 1} = \left([A]_{m \times 3}^T [A]_{m \times 3} \right)^{-1} [A]_{m \times 3}^T \{\Delta u\}_{m \times 1} \quad (7)$$

2.2 隧道变形及围岩压力的特征

通常隧道的监测位移是从初期支护施作时开始, 止于衬砌的施作, 如图 2 所示。0 时刻施作初期支护, t_1 时刻初期支护闭合, t_2 时刻施作衬砌, 0~ t_2 时间段为初期支护变形监测时间。根据初期支护监测位移预测隧道的变形, 衬砌施作前 (t_2 时刻), 初期支护已发生变形为 u , 预测的初期支护剩余变形为 Δu 。衬砌的施作会约束初期支护的变形, 隧道的变形小于由初期支护监测位移预测的变形值, 衬砌最终产生变形量为 $\Delta u'$ 。

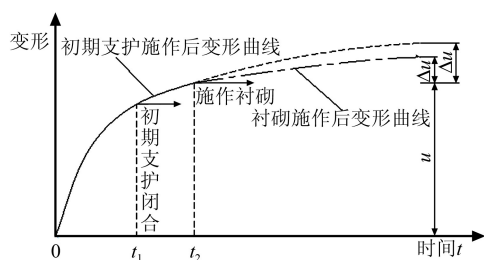


图 2 隧道变形曲线

Fig.2 Curves of tunnel deformation

初期支护和衬砌背后压力随着时间的增加逐渐增大, 趋于稳定, 如图 3 所示。按照衬砌施作的时间, 初期支护背后压力 p_s 可分为两部分, 即 p_{s1} 为衬砌施作前与已发生变形 u 对应的压力和 p_{s2} 为衬砌施作后与剩余变形 Δu 对应的压力, 砌背后压力 p_l 为与剩余变形 Δu 对应的压力。

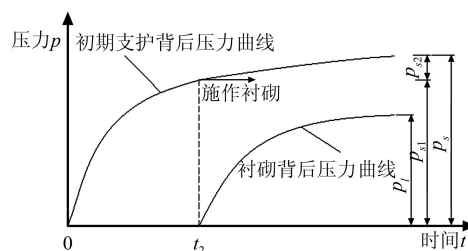


图 3 初期支护和衬砌背后压力曲线

Fig.3 Curves of pressure behind initial support and lining

2.3 衬砌分担围岩压力比例

根据隧道的监测位移, 利用上述反分析方法, 由初期支护已发生变形计算得到初期支护背后压力 p_{s1} 。由剩余变形计算得到相应围岩应力场, 将该应力场施加到初期支护和衬砌上, 经正分析得到初期支护背后压力 p_{s2} 和衬砌背后压力 p_l 。按照式 (8) 计算衬砌分担围岩压力比例, 具体过程见图 4。

衬砌分担围岩压力比例 =

$$\frac{\text{衬砌背后压力 } p_l}{\text{初期支护背后压力 } p_s} \times 100\% \quad (8)$$

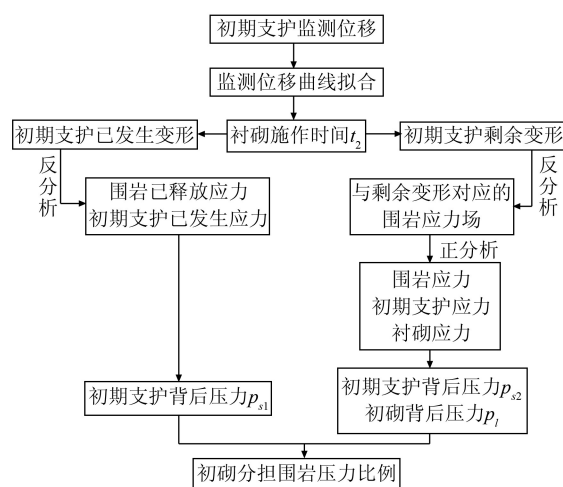


图 4 衬砌分担围岩压力比例计算流程

Fig.4 Calculation process of lining sharing ratio of surrounding rock pressure

3 工程概况及现场试验

3.1 工程概况

某新建铁路隧道位于河南省南阳县境内, 隧道进口里程 DK840+773, 出口里程 DK841+475, 全长 701 m, 最大埋深为 137 m。隧道纵向进口路肩设计高程 438.239 m, 出口路肩设计高程为 430.104 m, 单向纵坡, 设计坡度为 11.6%。洞身主要穿越白云质云母石英片岩局部夹角闪片岩、大理岩地层,

围岩级别为 IV 级,地质纵剖面如图 5 所示。横断面采用单洞双线形式,断面尺寸如图 6 所示。

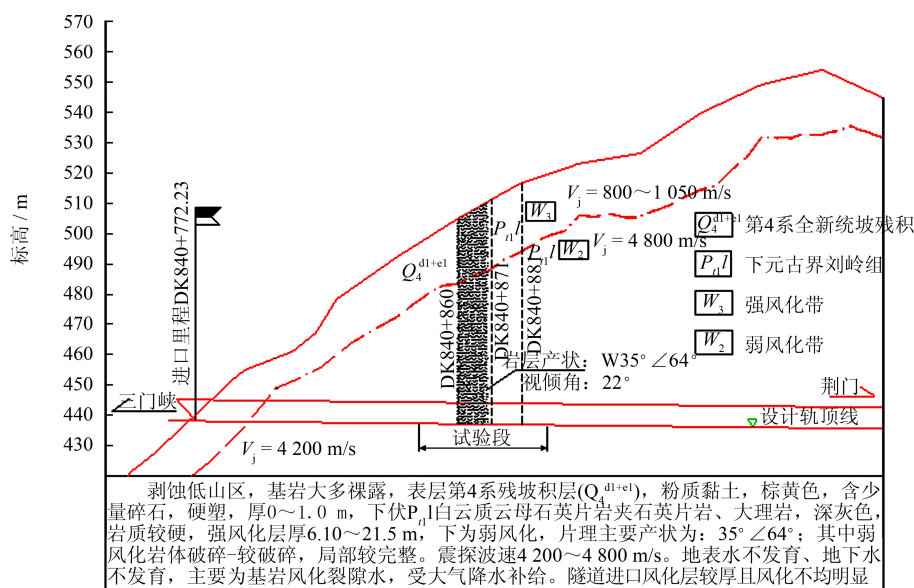


图 5 地质纵剖面示意图

Fig.5 Sketch of geological longitudinal section

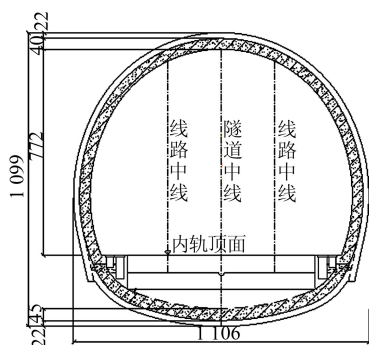


图 6 隧道横断面示意图(单位: cm)

Fig.6 Sketch of cross section of tunnel(unit: cm)

3.2 现场试验

3.2.1 试验断面和复合式衬砌参数

为了了解该新建隧道初期支护和衬砌背后的压力情况,选取 DK840+855~DK840+885 段进行现场试验,试验断面里程及复合式衬砌相关参数,见表 1。

表 1 试验断面和复合式衬砌参数

Table 1 Test section and composite lining parameters

断面里程	埋深/m	初期支护参数	衬砌参数
DK840+860	60	C25 喷混凝土: 全环 22 cm	拱墙: 40*
DK840+871	66	格栅钢架:	仰拱: 45*
DK840+881	73	全环 H150@0.75 m	

注:“H150”表示格栅钢架型号;“*”表示钢筋混凝土。

程中对初期支护的变形进行监测。同时,在初期支护和衬砌背后布置压力盒,对现场压力进行监测。监测位移和压力盒的测点布置和现场元件布置如图 7、8 所示。

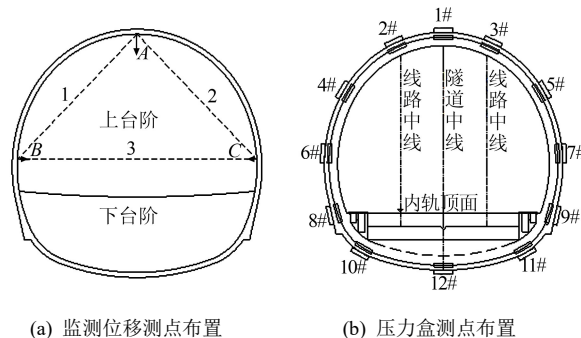


图 7 监测位移和压力盒的测点布置

Fig.7 Monitoring point layout of displacement and pressure cells



(a) 拱部

(b) 侧墙

图 8 压力盒现场布置

Fig.8 In-situ layout of pressure cells

3.2.2 变形及压力监测点的布置

隧道采用微台阶法开挖,下台阶较小。施工过

3.2.3 监测结果

根据隧道 DK840+884 断面 2017 年 5 月 1 日至 6 月 25 日的监测位移数据,利用双曲线函数^[19]对初期支护的监测位移进行拟合,即

$$u(t) = t / (A + Bt) \quad (9)$$

式中: $u(t)$ 为变形值; A 、 B 为回归系数; t 为时间。

拱顶沉降和内空变形的拟合结果及曲线见表 2 和如图 9 所示。

表 2 监测位移的拟合结果

Table 2 Fitting results of monitoring displacements

位置	回归函数	相关性系数	收敛值 / mm
拱顶 (GD-A)	$u(t) = t / (0.97184 + 0.1244t)$	0.94231	8.1
内空 (CQ-BC)	$u(t) = t / (0.27567 + 0.04894t)$	0.93118	20.4

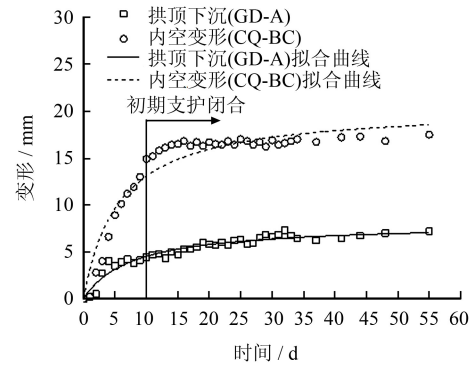


图 9 监测位移拟合曲线

Fig.9 Fitting curves of monitoring displacements

整理各试验断面相应测点的压力监测结果,2017 年得到初期支护和衬砌背后压力随时间的变化曲线,如图 10 所示。

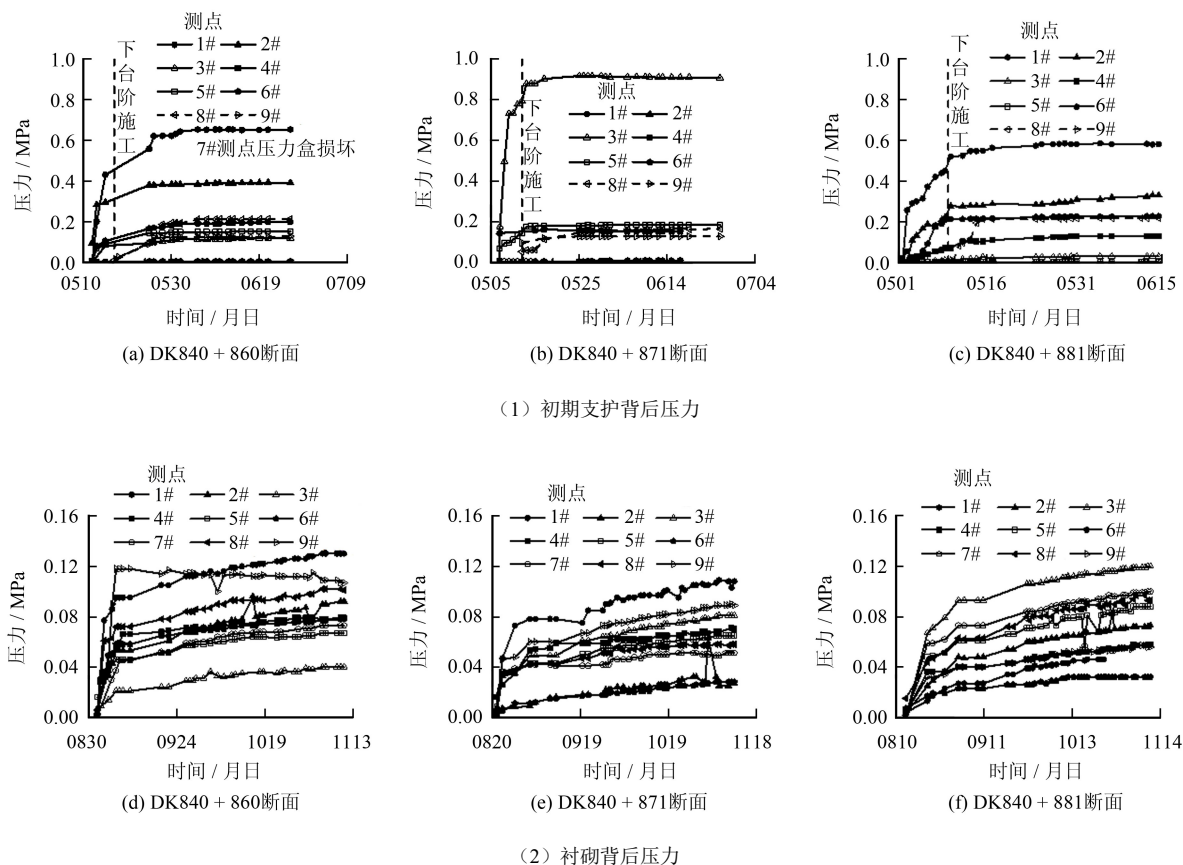


图 10 初期支护和衬砌背后压力随时间的变化曲线

Fig.10 Time-history curves of pressure behind initial support and lining

由图 10 可见,初期支护和衬砌背后压力随着时间的增加逐渐增大,后趋于平缓,前期增长速率较快;初期支护背后压力较大值多集中于拱顶和拱肩处,约为 0.6~0.9 MPa,其他位置压力值均小于 0.3 MPa;衬砌背后压力值较小,约为 0.02~0.14

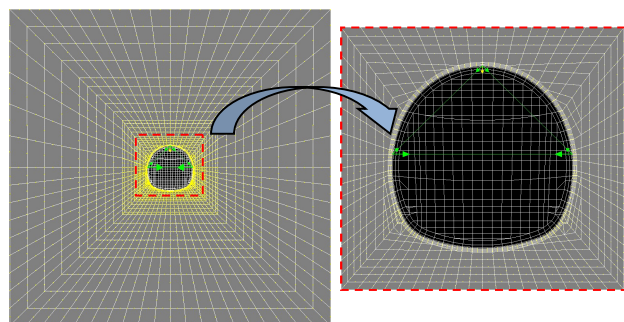
MPa,压力分布相对均匀,拱部压力值略大。

4 衬砌分担围岩压力比例的计算

4.1 有限元模型及计算条件

利用反分析软件建立该隧道的有限元模型,模

型尺寸为 100 m×100 m, 边界条件为四周固定, 如图 11 所示。



(a) 有限元整体模型

(b) 有限元局部模型

图 11 反分析的有限元模型

Fig.11 Finite element model of back analysis

主要过程包括: (1) 有限元离散; (2) 边界条件设定; (3) 围岩及支护材料参数设定; (4) 指定开挖及支护区域; (5) 各测点相对变形值输入; (6) 反分析计算。正分析有限元模型及边界条件与反分

析一致, 计算过程不再重述。现场施作衬砌的时间为初期支护闭合后 95 d, 结合监测位移的拟合曲线, 计算初期支护已发生变形及剩余变形。根据地勘报告和规范^[20]确定围岩及支护材料参数, 初期支护和衬砌的弹性模量采用等效抗弯刚度法计算。有限元计算条件见表 3。

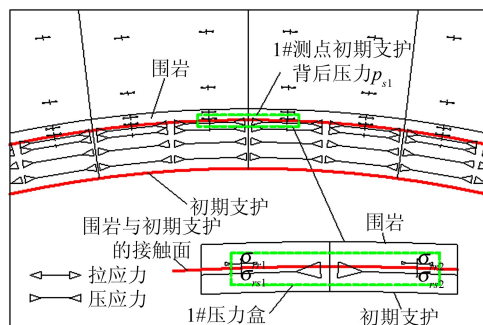
4.2 现场监测和反分析结果的比较

根据力的平衡条件, 围岩与初期支护间及初期支护与衬砌间相邻单元的法向应力是连续的, 因此可以从有限元计算结果得到初期支护和衬砌背后压力。初期支护背后压力为监测点处围岩和初期支护相邻单元内高斯点法向应力的平均值, 衬砌背后压力为监测点处初期支护和衬砌相邻单元内高斯点法向应力的平均值。图 12 为拱顶位置 (1#测点) 处衬砌施作前后围岩和支护的应力分布, 计算得到初期支护和衬砌背后压力。初期支护背后压力 p_{s1} 按式 (10) 计算。

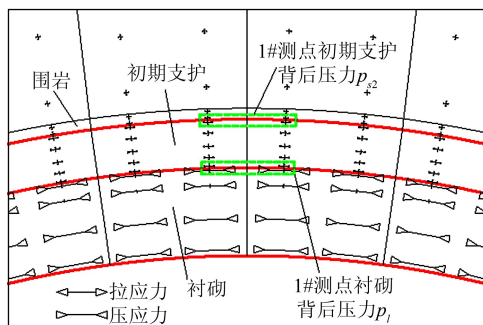
表 3 有限元计算条件

Table 3 Conditions of finite element calculation

时间 /d	已发生变形 / mm		剩余变形 / mm		弹性模量 E / GPa			泊松比 μ		
	拱顶沉降	内空变形	拱顶沉降	内空变形	围岩	初期支护	衬砌	围岩	初期支护	衬砌
95	7.5	19.3	0.6	1.1	0.614	5.350	33.500	0.35	0.25	0.25



(a) 初期支护



(b) 初期支护+衬砌

图 12 初期支护和衬砌背后压力 (拱顶)

Fig.12 Pressure behind initial support and lining (vault)

$$p_{s1} = \frac{\sigma_{rr1} + \sigma_{rs1} + \sigma_{rr2} + \sigma_{rs2}}{4} \quad (10)$$

式中: σ_{rr1} 、 σ_{rr2} 为围岩法向应力; σ_{rs1} 、 σ_{rs2} 为初期支护法向应力。同理, 得到初期支护背后压力 p_{s2} 和衬砌背后压力 p_l 。

初期支护和衬砌背后压力的现场监测值为 3 个试验断面相应测点压力盒监测末期压力值的平均。比较各测点处初期支护和衬砌背后压力的现场监测和反分析计算结果, 见表 4 和如图 13、14 所示。

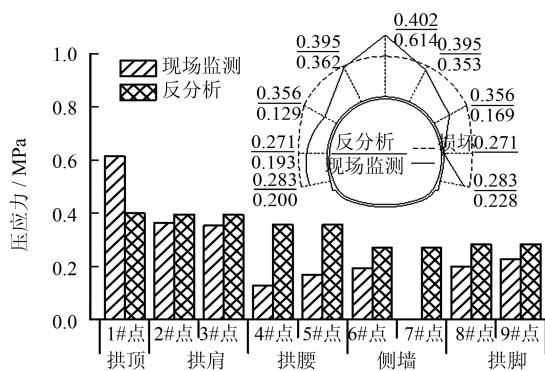
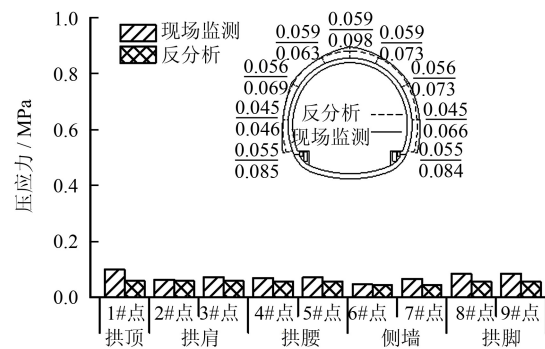
由表 4 和图 13、14 可见, 初期支护背后压力 p_{s1} , 拱顶和拱肩处现场监测和反分析计算结果比较一致, 约为 0.40~0.61 MPa, 其他部位反分析计算结果比现场监测值稍大, 约为 0.10~0.35 MPa; 压力分布呈“拱部大, 侧墙及拱脚小”, 基本左右对称的特点。衬砌背后压力 p_l , 现场监测和反分析计算结果一致, 约 0.05~0.10 MPa; 不同位置处压力值相差不大, 分布均匀, 基本左右对称。初期支护和衬砌背后压力的现场监测和反分析计算结果较为一致, 说明基于监测位移通过反分析计算初期支护和衬砌背后压力的方法是可行的。

表 4 初期支护和衬砌背后压力的现场监测和反分析结果比较

Table 4 Comparison of monitoring and back analysis results of pressure behind initial support and lining

支护	压应力 / MPa	监测、反分析	拱顶	拱肩		拱腰		侧墙		拱脚	
			1#测点	2#测点	3#测点	4#测点	5#测点	6#测点	7#测点	8#测点	9#测点
初期支护	初期支护背后压力 p_{s1}	现场监测	0.614	0.362	0.353	0.129	0.169	0.193		0.200	0.228
		反分析	0.402	0.395	0.395	0.356	0.356	0.271	0.271	0.283	0.283
初期支护 +	初期支护背后压力 p_{s2}	现场监测									
		反分析	0.063	0.063	0.063	0.058	0.058	0.049	0.049	0.061	0.061
衬砌	衬砌背后压力 p_l	现场监测	0.098	0.063	0.073	0.069	0.073	0.046	0.066	0.085	0.084
		反分析	0.059	0.059	0.059	0.056	0.056	0.045	0.045	0.055	0.055

注：衬砌施作后初期支护背后压力 p_{s2} 无监测值。

图 13 初期支护背后压力 p_{s1} 的比较 (单位: MPa)Fig.13 Comparison of pressure behind initial support p_{s1} (unit: MPa)图 14 衬砌背后压力 p_l 的比较 (单位: MPa)Fig.14 Comparison of pressure behind lining p_l (unit:MPa)

4.3 衬砌分担围岩压力比例的确定

衬砌分担围岩压力的比例直接影响到衬砌的受力状态及稳定程度。将初期支护背后压力 p_{s1} 及 p_{s2} 求和得到总压力 p_s (鉴于初期支护背后压力 p_{s2} 无现场监测值, 近似由反分析结果代替)。根据衬砌背后压力 p_l 和初期支护背后压力 p_s , 按照式 (8) 计算衬砌分担围岩压力的比例。初期支护和衬砌背后压力及衬砌分担围岩压力比例的现场监测和反分析的结果见表 5 和如图 15、16 所示。

由表 5 和图 15、16 可知, 初期支护背后压力 p_s 的反分析计算和现场监测结果较为一致, 最大压力值分别为 0.465 MPa 和 0.677 MPa, 均发生在拱顶位置; 压力分布呈“拱部大, 侧墙及拱脚小”, 基本左右对称分布的特点。衬砌分担围岩压力比例, 现场监测值约 15%~35%, 反分析计算结果为 13%~16%, 现场监测比反分析计算结果大, 拱顶和拱肩位置两者较为一致。通过现场监测和反分析计算结果的对比, 说明基于位移监测数据利用反分析方法确定初期支护和衬砌背后压力及衬砌分担围岩压力比例的方法是可行的, 为复合式衬砌结构的设计提供了新思路, 具有一定的参考意义。

表 5 衬砌分担围岩压力比例

Table 5 Lining sharing ratio of surrounding rock pressure

		Table 3. Bearing sharing ratio of surrounding rock pressure								
项目	监测、反分析	拱顶	拱肩		拱腰		侧墙		拱脚	
		1#测点	2#测点	3#测点	4#测点	5#测点	6#测点	7#测点	8#测点	9#测点
衬砌背后压力 p_l / MPa	现场监测	0.098	0.063	0.073	0.069	0.073	0.046	0.066	0.085	0.084
	反分析	0.059	0.059	0.059	0.056	0.056	0.045	0.045	0.055	0.055
初期支护背后压力 p_s / MPa	现场监测	0.677	0.425	0.416	0.187	0.227	0.242		0.261	0.289
	反分析	0.465	0.458	0.458	0.414	0.414	0.320	0.320	0.344	0.344
衬砌分担围岩压力 比例 / %	现场监测	14.5	14.8	17.5	36.9	32.2	27.3		32.6	29.1
	反分析	12.6	12.8	12.8	13.4	13.4	14.1	14.1	15.8	15.8

参考文献

- [1] 肖明清, 孙文昊. 考虑环境作用的复合式衬砌结构设计方法探讨[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(12): 55—59.
XIAO Ming-qing, SUN Wen-hao. Research on the design methods of composite tunnel lining on consideration of environmental effect[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2009, 26(12): 55—59.
- [2] 王建宇. 对隧道衬砌结构计算问题的思考[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 1—4.
WANG Jian-yu. On calculation of tunnel lining structure[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2014, 51(2): 1—4.
- [3] 赵子荣, 张玉琴, 季良杰, 等. 南岭双线铁路隧道软岩复合式衬砌围岩压力的试验研究[J]. 水利学报, 1985, (10): 29—38.
ZHAO Zi-rong, ZHANG Yu-qin, JI Liang-jie, et al. The test study of the surrounding rock pressure acting on the composite lining in weak rock of nanling double track railway tunnel[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1985, (10): 29—38.
- [4] 王晓彤, 丁文其, 刘学增, 等. 地下洞室围岩压力分配比例研究[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(增刊): 144—147.
WANG Xiao-xing, DING Wen-qi, LIU Xue-zeng, et al. Study on the proportion of pressure distribution in surrounding rock of underground caverns[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2006, 43(Supp): 144—147.
- [5] 赵占厂, 谢永利, 杨晓华, 等. 黄土公路隧道衬砌受力特性测试研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 66—69.
ZHAO Zhan-chang, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Observation research on the mechanical characteristic of highway tunnel lining in loess[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(1): 66—69.
- [6] 李鹏飞, 张顶立, 赵勇, 等. 大断面黄土隧道二次衬砌受力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1690—1696.
LI Peng-fei, ZHANG Ding-li, ZHAO Yong, et al. Study of mechanical characteristics of secondary lining of large-section loess tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(8): 1690—1696.
- [7] 刘志春, 李文江, 孙明磊, 等. 乌鞘岭隧道 F4 断层区段监控量测综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1502—1511.

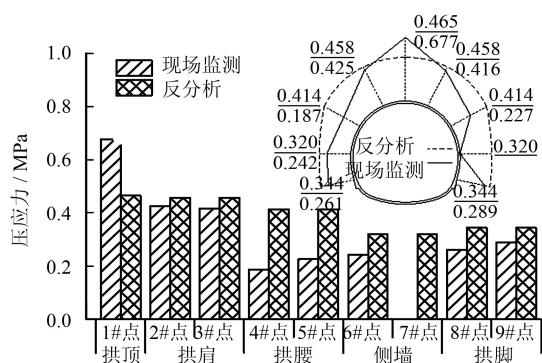
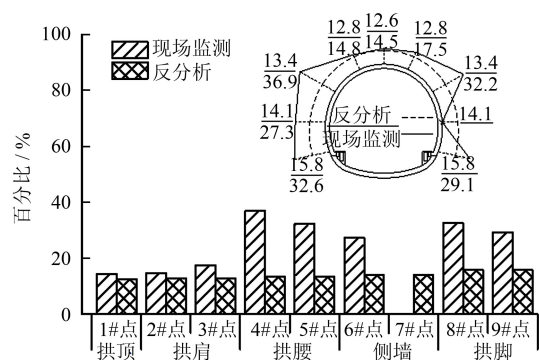
图 15 初期支护背后压力 p_s 的比较 (单位: MPa)Fig.15 Comparison of pressure behind initial support p_s (unit: MPa)

图 16 衬砌分担围岩压力比例的比较 (单位: %)

Fig.16 Comparison of lining sharing ratio of surrounding rock pressure(unit: %)

5 结 论

(1) 基于位移反分析技术给出了一种计算初期支护和衬砌背后压力, 进而得到衬砌分担围岩压力比例的方法, 为复合式衬砌结构的设计提供了一种新思路。

(2) 结合新建隧道位移监测数据, 反分析计算得到初期支护和衬砌背后压力, 计算结果与现场监测结果比较一致: 初期支护背后压力约 0.32~0.47 MPa, 分布呈“拱部大, 侧墙及拱脚小”的特点; 衬砌背后压力约 0.04~0.06 MPa, 压力分布比较均匀。

(3) 该隧道初期支护闭合 95 d 后施作衬砌, 衬砌背后压力不大, 分担围岩压力比例较小。衬砌分担围岩压力比例现场监测和反分析结果分别为 15%~35%和 13%~16%; 拱顶和拱肩位置两者比较一致约 13%~15%, 拱腰、侧墙及拱脚处现场监测结果较大, 约为反分析结果的 2 倍。

- LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, SUN Ming-lei, et al. Monitoring and comprehensive analysis in F4 section of wuqiaoling tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1502—1511.
- [8] 韩现民, 孙明磊, 李文江, 等. 复杂条件下隧道断面形状和支护参数优化[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 725—731.
- HAN Xian-min, SUN Ming-lei, LI Wen-jiang, et al. Optimization of section shape and support parameters of tunnel under complicated conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 725—731.
- [9] 杨昌贤, 崔光耀, 王乐明. 基于监控量测的公路隧道二次衬砌受力分担比例[J]. 世界地质, 2012, 31(1): 193—198.
- YANG Chang-xian, CUI Guang-yao, WANG Le-ming. Shared ratio of pressure in secondary lining based on field monitoring and measuring in highway tunnel[J]. **Global Geology**, 2012, 31(1): 193—198.
- [10] 何本国, 朱永全, 孙明磊, 等. 高速铁路石膏角砾岩深埋隧道支护荷载确定方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 827—832.
- HE Ben-guo, ZHU Yong-quan, SUN Ming-lei, et al. Method for determining supporting load of deep tunnel on high-speed railway in gypsum breccia stratum[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 827—832.
- [11] 莫勋涛, 金德银, 张清. 用隧道围岩站立时间确定复合式衬砌的荷载分配[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 370—373.
- MO Xun-tao, JIN De-yin, ZHANG Qing. Ground pressure allocation for complex lining using stand-up time[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(3): 370—373.
- [12] 王华宁, 宋飞, 蒋明镜. 基于时效理论解的双层衬砌圆形隧道围岩压力分担的简便计算法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1600—1608.
- WANG Hua-ning, SONG Fei, JIANG Ming-jing. A simple method for supporting pressure determination of double-liner circular tunnel excavated in rheological rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(9): 1600—1608.
- [13] 杨建平, 陈卫忠, 郭小红. 小净距公路隧道支护时机对围岩稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 483—490.
- YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, GUO Xiao-hong. Effect of supporting time on stability of small spacing roadway tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 483—490.
- [14] 王迎超, 尚岳全, 孙红月, 等. 复合式衬砌在围岩蠕变过程中的受力规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 49—54.
- WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, et al. Study on mechanical rules of double-lining in creeping surrounding rock[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2010, 37(2): 49—54.
- [15] 呉旭, 中村敦, 桜井春輔. 計測変位から覆工安全性を評価する逆解析方法とその適用[C]//第 5 回日中シールド会議. Japan: [s. n.], 2009: 217—224.
- [16] 中村, 小野, 亀谷, 等. 膨張性地山での二次覆工の変状評価法と設計手法の提案[J]. トンネルと地下, 2007, 38(4): 39—46.
- [17] 桜井春輔, 武内邦文. トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法[C]//土木学会論文集. Japan: [s. n.], 1983: 137—145.
- [18] SAKURAI S, TAKEUCHI K. Back analysis of measured displacement of tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1983, 16(3): 173—180.
- [19] 中铁二院工程集团有限责任公司. Q/CR 9218—2015 铁路隧道监控量测技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Q/CR 9218-2015 Technical specification for monitoring measurement of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.
- [20] 中铁二院工程集团有限责任公司. TB 10003—2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. TB 10003-2016 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.