

# 隧道荷载—结构模型的位移随机反分析

朱永全\* 景诗庭

(石家庄铁道学院)

**提 要** 本文提出荷载—结构模式进行随机反分析方法,从隧道支护结构变形反推估计对应于支护结构上各部位的外荷载。提出了以实测位移为基础的样条函数插值,以插值位移补充大量的实测值,满足了反分析所需众多的已知位移数。本文通过一施工实例对该方法的可用性进行了检验。

**主题词** 随机反分析 隧道支护结构 压力和抗力 围岩

## 1 前 言

隧道衬砌结构所处环境为围岩,围岩参数和原始地应力都可以通过不同形式的现场试验来测定。不难理解,岩土工程的性状是由某一空间范围内岩土的平均特性所决定的。根据一个个采样点的岩样试验或现场试验所获结果称为工程的点特性。而围岩的力学性质是必须根据其结构的形状、尺寸甚至施工的影响等实际情况来评价,这就意味着,上述工程的点特性值难以直接用来作为分析的输入数据。况且现场原位测试工作量很大,不是所有工点都有可能进行。因而根据现场施工的实际变形量测值,反推围岩参数、初始地应力及隧道支护结构作用荷载是比较可行的途径。

岩土工程可靠性研究,因其岩土自身固有的、错综复杂的变异性,设计中应考虑到的不确定性远比地面结构严重。在岩土特性参数、作用效应和设计方法等可靠性研究方面尚处于发展、积极探索研究阶段。铁路隧道衬砌结构可靠性设计研究虽已起步,但仅涉及到按传统矿山法修建的隧道结构。即按地面结构可靠性设计方法,视围岩的松弛压力为作用于衬砌结构上的荷载,分别研究荷载效应和支护结构抗力的不确定性,从而确定支护结构的可靠度。该方法目前尚存在如下困难,即:围岩分类和假定荷载分布图形的主观性;不同施工方法引起的支护结构实际作用荷载及内力的变异性。

荷载—结构模式是否接近实际,关键是对支护结构所受荷载(围岩压力及约束力)的正确估算。作用于支护结构的荷载不仅与隧道地形、地质条件有关,还与隧道洞室形状、大小、支护结构形态及施工方法等因素有关。支护结构的变形是各种荷载作用下综合反映,利用隧道施工

\* 本文收稿日期 1996-01-13 朱永全 副教授 石家庄铁道学院岩土与结构中心试验室主任 河北 邮码: 050043

中的监控量测数据,反推支护结构的围岩压力和抗力,被认为是更加接近实际的方法。

荷载—结构反分析方法,虽然仅分析支护结构,但它可把支护与周边围岩介质间的相互作用考虑进去,获得隧道结构受力状态的反分析解。该方法具有下列显著特点:(1)反推得的围岩荷载能反映实际地质及施工等条件下隧道支护结构的实际受力状况。(2)可了解作用于支护结构上常规压力以外的各种荷载,诸如因挤压的局部荷载、因隧道穿越滑坡体或斜坡段经常发生的偏压荷载等。(3)与地层结构模式或收敛—约束模式相比,其计算过程简单,可为现行隧道支护结构设计提供直接参数。

## 2 荷载—结构模型的反分析方法

### 2.1 基本假定和结构模拟

将围岩主动压力和围岩弹性抗力(被动压力)均视为作用于支护结构上的外荷载,并等效为作用于支护结构单元节点上的径向和切向荷载(在大多数情况下,切向荷载比径向荷载小,为简化而忽略其作用),仅对支护结构离散单元进行分析。将支护结构用弹性梁单元离散化,当仰拱后于墙拱施工时可忽略其对支护结构的贡献。设边墙底面弹性固定,能产生转动和垂直下沉,不产生水平位移。

### 2.2 隧道施工监测位移值的样条函数插值

为保证计算精度,支护单元离散化的个数一般较多,需反推的支护结构节点荷载个数也较多。而实际施工中实测<sup>[3]</sup>的位移值往往仅 6 个左右,这将不能满足荷载反推对已知支护结构实测位移最少个数的需求。

在隧道轮廓平顺的一般情况下,支护结构变形在其周边是一连续函数。可以利用施工中少数几个控制点的位移监控量测值,以样条插值函数曲线近似代替隧道支护结构的实际变形曲线。作者曾对 78 种现行标准设计隧道衬砌断面用计算结果与插值结果作比较,其最大绝对误差小于 0.18mm,其相对误差在墙部小于 12.07%。还对带有量测误差的支护结构实测位移,采用 Monte—Carlo 模拟解决样条函数的随机插值问题,计算表明正态误差分布的量测位移,随机插值也近似服从正态分布(过程略,见“样条插值函数在隧道监控位移分析中的应用”一文,另文发表)

### 2.3 隧道施工监测位移随机误差的处理

隧道施工监测数据,由于量测仪器的精度和偶然因素影响是带有随机误差的一组数。量测误差一般为正态分布的,且相互独立。用 Monte—Carlo 模拟过程是首先对已知的随机量测位移进行抽样,在量测位移一次抽样值下进行荷载—结构反分析,获得隧道结构的围岩荷载和围岩抗力的一次抽样结果。当抽样次数满足规定的次数后,对反分析的抽样结果进行统计分析,从而近似获得随机反分析结果。

### 2.4 直接反分析准则方程

根据线性规划技术,误差函数(或准则函数)取得极小时的参数  $p$ ,即为待求参数。误差函

数记为:

$$J(P) = \sum_{i=1}^M [u^{*k} - u^k(p)]^2 \quad (1)$$

式中:  $u^{*k}$ —第  $k$  点位移量测值(或插值位移);  $u^k(p)$ —第  $k$  点的位移数值计算值,  $p$ —待求参数, 如围岩压力;  $m$ —测值个数。

荷载—结构计算方法的有限元基本列式为:

$$\{P\} = [K]\{U\} \quad (2)$$

式中:  $\{P\}$  为支护结构节点的围岩主动和被动荷载的等效节点荷载,  $\{U\}$  为支护结构节点位移,  $[K]$  为支护结构的刚度矩阵。

## 2.5 支护结构各节点的荷载估计

支护结构各节点荷载的反推过程如下:

- (1) 仅将衬砌结构用弹性梁单元离散化;
- (2) 沿衬砌结构单元节点逐个施加单位力,

$$P(i) = 1.0; \quad P(j) = 0.0, \quad i = 1, 2, \dots, n-2; \quad j \neq i \quad (3)$$

式中,  $n$  为结构离散单元的节点个数。

对每一组节点荷载, 由式(2)计算对应收敛量测值的计算值, 形成单位荷载下的位移矩阵  $[U^k(k, i)]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-2; k = 1, 2, \dots, m$ 。

(3) 将  $U^k$  代入式(1), 按最小二乘法(或其它方法)求解式(1)从而确定作用于支护结构各节点上的围岩压力。

## 3 实例研究

北京地铁西单车站 1<sup>#</sup> 施工横通道, 测线布置如图 1, 洞室变形稳定后各测线收敛值及误差如表 1 所示。

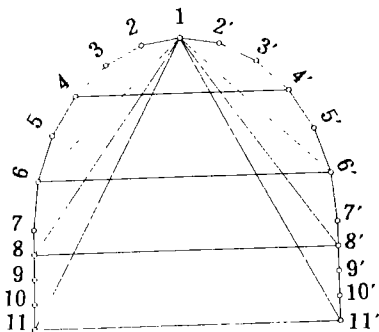


图 1 断面单元划分和位移量测线布置

### 3.1 支护结构节点位移的样条函数插值

根据位移实测值, 分别对支护结构各节点水平收敛(两侧对应节点间的相对位移)和节点斜向收敛(节点分拱顶节点间的相对位移), 经样条函数随机(1 000 次 Monte-Carlo 模拟抽样)插值, 支护结构各节点的收敛值如表 1 所示。

### 3.2 支护结构各节点荷载反推估计

将支护结构用弹性梁单元离散为 20 个单元(图 1 所示)。根据表 1 所示插值收敛位移, 经 1 000 次 Monte-Carlo 模拟抽样, 作用于支护结构节点上法向外荷载由表 2 和图 2 所示。

表 1 节点收敛值与随机插值结果(mm)

节 点	水平收敛				斜向收敛(左)				斜向收敛(右)			
	实测值		插值		实测值		插值		实测值		插值	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
2			0.031	0.010			0.034	0.002			0.035	0.002
3			-0.186	0.036			0.039	0.004			0.039	0.004
4	-0.627	0.070	-0.672	0.071	0.024	0.002	0.024	0.002	0.024	0.002	0.024	0.002
5			-1.153	0.104			0.053	0.004			0.053	0.004
6	-1.243	0.110	-1.243	0.111	0.214	0.005	0.214	0.001	0.215	0.006	0.215	0.001
7			-0.836	0.077			0.533	0.023			0.534	0.024
8	-0.555	0.052	-0.555	0.052	0.708	0.044	0.708	0.044	0.709	0.044	0.709	0.044
9			-0.309	0.033			0.851	0.066			0.853	0.067
10			-0.132	0.016			0.958	0.087			0.960	0.088
11	0.000	0.000	0.000	0.000	1.039	0.105	1.039	0.105	1.041	0.106	1.041	0.107

注:向洞内收敛为正

由表 2 知,节点外荷载具有较好的对称性。但各节点外荷载并不是均匀的,如墙部 7—10 节点,靠近墙脚约束的 10 和 10' 节点,支护结构面向围岩的变形很小,围岩产生于支护结构的弹性抗力也很小,相反墙顶节点(7 和 7' 节点)有较大的围岩弹性抗力产生。拱部节点外荷载大于墙部各节点,这也反映了松散地层中隧道支护结构主要承受地垂直压力的一般规律。

由表 2 知,在表 1 所示已知位移的随机分布条件下,随机反推的节点外荷载分布较离散,即表 2 中各节点外荷载的标准差较大。

表 2 支护结构各节点荷载随机反推估计结果(kN)

节 点	均 值	标准差	最大值	最小值	换算分布荷载(kN/m <sup>2</sup> )
10	19.49	4.82	37.8	4.98	49.85
9	24.70	10.70	69.80	-0.15	62.20
8	25.34	11.63	70.19	0.09	63.35
7	43.89	14.81	87.13	0.09	73.87
6	71.24	1.97	77.37	63.92	90.36
5	80.98	20.58	109.90	1.91	102.72
4	92.13	18.45	141.51	29.87	116.86
3	107.03	18.15	156.79	34.87	135.75
2	95.65	38.95	245.29	1.69	121.32
1'	118.10	38.59	195.44	4.40	149.81
2'	95.64	38.64	250.78	1.50	121.31
3'	107.02	18.49	156.55	34.73	135.74
4'	92.12	18.18	141.96	29.46	116.85
5'	80.98	20.25	109.63	2.57	102.72
6'	71.23	1.79	76.79	64.59	90.35
7'	43.90	14.46	87.72	0.10	73.98
8'	25.34	11.32	70.50	0.07	63.33
9'	24.91	10.99	65.69	-0.23	63.27
10'	19.92	6.38	43.59	0.10	49.79

注:单位计算长度。

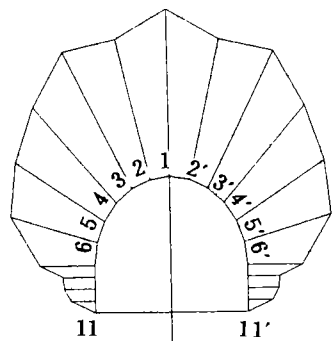


图2 支护结构外法向作用荷载均值分布

## 4 结论

荷载—结构反分析方法,从隧道支护结构变形反推估计对应的节点荷载。因所需反推的参数较多,提出了以实测位移为基础的样条函数插值,以插值位移补充大量的实测值,满足了反分析所需众多的已知位移个数。

该方法可估计作用于支护结构上各部位的外荷载,使人们对隧道支护结构因覆土压力、被动抗力、因施工因素对地层扰动不均匀等对支护产生的作用和作用效应为较明确的了解,为支护结构可靠度分析提供支护结构实际作用荷载的重要基础。

## 参考文献

- 1 样条函数及其应用. 西北工业大学出版社. 1989.
- 2 王韶华, 黄瑞霖编著. 应用数值分析. 西南交通大学出版社. 1987.
- 3 铁路隧道设计规范(TBJ3—85). 北京: 中国铁道出版社. 1986.
- 4 X. Nic and Q. Zhang. A SYSTEM OF Monitoring and Dimensioning Tunnel support. Rock mechanics and Rock Engineering. (1994). 27(1)
- 5 K. Najm and Y. Ishijima. Back Analysis of tunneling Deformation: Development and Application of passive resistance method. Rock Mech. Rock Engn. (1993). 26(1).
- 6 吴康保, 景诗庭. 随机有限元法在地下结构可靠度分析中的应用. 计算方法在岩石力学及工程中的应用国际会议论文集. 1993.
- 7 刘怀恒, 王芝银. 软岩洞库稳定性监控及分析. 西安矿院学报. 1986(2).

## STOCHASTIC BACK ANALYSIS OF TUNNEL DEFORMATION ON LOAD—STRUCTURE MODEL

Zhu Yongquan Jin Shiting

Shijiazhang Railway Institute

**Abstract** A stochastic back analysis method of load—structure model is proposed to estimate load on tunnel lining according to the measured displacements. The spline interpolation function was calculated by the field measured displacements of key lining points and was used to replace approximately the real displacement function of tunnel. The interpolation displacements of lining points can provide the necessary number of measured data in this back analysis. A case study on a tunnelling is presented to illustrate the effectiveness of this method.

**Keywords** stochastic back analysis; tunnel lining structure; active and passive load; surrounding rock