

隧道结构可靠性分析的一种新方法

白小亮 杨成永

赵慧丽

(北方交通大学土木建筑学院,北京 100044) (石家庄铁道学院,石家庄 050043)

【摘要】 论述了用应力场进行隧道结构可靠性分析存在的问题,分析了目前位移在隧道结构可靠性分析应用中存在的缺点和困难,提出了另一种新的应用方法。

【关键词】 位移;可靠性;应变作用效应;应变强度

【中图分类号】 U451

A New Way of the Reliability Analysis of Tunnel Structure

【Abstract】 The problem in the tunnel structure reliability analysis by stress field is discussed. And the defect and difficulty of displacement application in the tunnel structure reliability analysis is analyzed. Then another new application is put forward.

【Key words】 displacement; reliability; action effect of strain; strain strength

在隧道结构工程中,为了能安全适用、经济合理、确保质量、快速施工,必须对工程结构及围岩系统作出稳定性或可靠性分析,以便能及时或提前采取措施,作出合理的设计、施工决策。

1 用应力场进行隧道结构可靠性分析存在的问题

隧道属于地下隐蔽工程,其所处的环境条件与地面工程是完全不同的。一个重要的力学特性就是:地下工程修筑在应力岩体中,即修筑在有一定应力履历和应力场的岩体中。所以,应力岩体的状态就不能不极大地影响着在其中发生的一切力学现象。当采用传统的应力“R-S”模式进行隧道结构可靠性分析时存在以下几方面的问题。

1.1 隧道结构的力学计算模式问题

荷载反力模型是我国隧道设计规范中推荐采用的一种计算方法,该力学计算模式存在两方面的问题。一是采用传统的结构力学方法,把支护结构和围岩分割开来,岩体作为

给定荷载,支护结构作为承载结构;二是认为围岩压力来源于坍塌岩块的重量。显然,这是不符合实际情况的。随着近代岩体力学和隧道力学的发展,人们已清楚地认识到:围岩除了形成对支护结构的荷载以外,它自身也是承载结构的一个重要组成部分,隧道围岩与支护结构应看成统一的结构体系;围岩压力的来源也不仅仅是坍塌岩块的重量,围岩压力是隧道开挖影响到初始应力重新分布以后,作用在支护结构的压力。影响围岩压力分布规律的因素很多,主要有:围岩的工程地质条件(初始应力场)、水文地质条件(地下水)、围岩体的强度(各种结构面)、围岩压力的时间效应、隧道的形状和尺寸、隧道的埋置深度、支护结构的特性、隧道的施工方法等等。

目前确定围岩压力有3种办法:①是直接量测。该方法由于受目前量测设备和技术水平所限,一时还难于普遍采用。②是从理论上研究围岩压力的估算方法。由于地质条件千变万化,影响围岩压力的因素又非常多,这

些因素本身及它们彼此之间的组合也带有一定的不定性,企图建立一种完善的、适合各种客观实际情况的通用围岩压力理论和计算方法非常困难。③是根据资料的统计和总结,按不同围岩类别提出围岩压力的经验数值(经验公式)。因此,围岩压力的确定就带有很大的不确定性。

目前流行于世的隧道结构设计除了荷载反力模型,还有收敛约束模型、连续体模型。收敛约束模型虽然认为围岩压力 and 支护抗力是在围岩和支护系统共同变形中形成的,主要关心的是支护抗力作用下的地层状态,不是荷载作用下的支护结构状态,体现了新奥法的岩石支承作用的思想。但在具体应用时,存在很多问题,首先目前仍无法正确确定地层和支护的响应曲线(特征曲线),从而使得该方法仍停留在定性的描述阶段。要使它作为隧道支护定量分析和设计的实用方法,还有许多理论上的问题需要解决。

在连续体模型中,计算的主要对象是岩体本身,虽然强调围岩-支护的共同作用,但是目前国内外尚无与之相适应的安全度评价标准,缺乏明确的定量设计依据以及围岩稳定性判据,以致在进行洞室(隧道)的有限元计算得到支护应力及围岩塑性区范围后,无法判定设计的支护强度是否合理^[1]。

1.2 支护结构与围岩的相互作用机理不清楚

围岩与支护结构是相互约束、共同作用的统一结构体系。在两者之中,任何一方的分布特性、分布规律的改变,必然会引起另一方的相应改变,至于它们是如何改变、改变多少等问题目前都还未能搞清楚。况且围岩压力对支护结构可能产生不利影响,也可能产生有利影响,这也是事先不可知的。

由于上述隧道结构工程本身的复杂性、相关理论的不完善,以及在隧道结构设计中,力学计算方法的结构计算模型及力学参数带有很大的模糊性,使得在以应力场为基础的

隧道结构可靠性分析显得十分困难。而从位移出发则不同了。隧道的坍塌破坏都是从围岩变形开始的,隧道断面周边各点围岩的位移(变形),是在隧道开挖以后应力重分布影响范围内,围岩内各点应变值沿该位移方向的积分。它是隧道开挖和支护过程中在众多因素影响下围岩整体力学性质稳定状态最直接、最能反映本质的客观表现。影响围岩稳定的众多的具体量值及其相互作用机理以及它们在施工过程中的动态变化,虽然并不清楚,但是在它们的共同作用下围岩整体稳定性的状况,是可以透过围岩周边位移量值的变化综合反映出来的,而且其量值也是可以直测量测到的^[2]。因此,利用位移来对隧道结构进行可靠性分析评价是一种合理的、有效的、简捷的方法。

2 位移在目前隧道结构可靠性分析中的应用

2.1 用监控量测的位移进行隧道稳定可靠性判定

用洞室位移来进行判别隧道的稳定性,既可量测又可实施控制,比较直观且便于使用,还可以避开以应力场建立强度判别的一些难点。

《铁路隧道设计规范》中就有“隧道稳定性位移判别准则”,所谓隧道稳定性位移判别,即根据隧道施工实测位移 U 与隧道极限位移 U_0 之间建立判别准则。即:

$$\begin{aligned} U \leq U_0 \text{ 时} & \quad \text{隧道稳定} \\ U > U_0 \text{ 时} & \quad \text{隧道不稳定} \end{aligned}$$

但隧道的极限位移与其所处的地形、地质条件、洞室形态、支护结构形态和施工等因素有关。而且还应结合现场观测和位移发展变化规律,进一步依据下述几项作出判别:①隧道开挖掌子面状态及支护状态观测结果;②位移速率;③位移速率的变化率。

显然,这种用位移(拱顶下沉和水平收敛)来判别围岩和支护结构稳定性的方法属于定值判别法。由于定值的位移判据很难确

定,量测结果的整理也有不少问题,用这种定值判别结果常与工程实际情况不符。有的超过允许位移,隧道洞室还安然无恙,有的未到允许位移就出现坍塌。因而,可以说目前的定值判别法还不完善。

《铁路隧道设计规范》中“隧道稳定可靠性分析”把隧道稳定的功能函数写为:

$$Z = G(U_R, U_S) = U_R - U_S \quad (1)$$

式中:位移作用效应 U_S 是隧道洞室实际量测位移;而位移强度 U_R 是通过随机模拟、室内模拟试验和现场调查统计等方法综合确定的。

稳定可靠度即功能函数 $Z > 0$ 时的概率,其表达式为:

$$P_S = P(Z > 0) = \int_S f(x) dx = 1 - \int_F f(x) dx \quad (2)$$

$$\text{而可靠度指标定义为: } \beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (3)$$

$f(x)$ 为功能函数的概率密度函数; μ_z 为功能函数的均值; σ_z 为功能函数的标准差^[3]。

在该方法中,隧道位移作用效应 U_S 和位移强度 U_R 是针对隧道某一测点或测线而言的。不同的测点有不同的可靠指标,起控制作用的是最小可靠指标和最大失效概率。但隧道围岩周边上的某一点失效并不能表明整个隧结构就一定失效。而且位移强度 U_R 是根据围岩参数和隧道设计参数的统计特征,用随机有限元方法,对隧道的极限位移进行随机计算模拟获得的。由于原始的围岩能参数和隧道设计参数的模糊性和不确定性,从而使位移强度 U_R 也带有很大的模糊性和不确定性,不能确切地反映工程实际。

2.2 监控量测的位移在反演理论中的应用

反演理论就是利用监控量测的位移反求初始应力和围岩的物性指标,在此基础上可以利用以应力场建立的强度判别准则进行隧道结构可靠性分析。同济大学杨德林等编著的《岩土工程问题的反演理论与工程实践》作了全面的阐述与介绍。但目前的问题是如何

选定一种反映实际工程主要特征的方法,更为重要的是所反演求出的原始应力和物性指标也应该是随机变量,能找出其统计特征,才能满足结构可靠度析之用。目前这种随机反分析方法尚处于起步阶段,还不足以用来指导工程实践。

3 隧道可靠性分析中的新方法

由于传统分析方法中存在这样或那样的问题,现提出一种新方法分析隧道结构的可靠性。

假设:隧道衬砌材料的应力-应变关系是线弹性的,而且拉伸和压缩时有相同的弹性模量,应变为平面应变,变形为纯弯曲、小变形。假定测得隧道某单元上三点在变形前(或前一刻)的相对坐标 $A(X_1, Y_1)$, $B(X_2, Y_2)$, $C(X_3, Y_3)$, 通过该三点的曲率圆半径为 R_1 , 在变形后(或后一刻)三点的相对坐标为 $A(X'_1, Y'_1)$, $B(X'_2, Y'_2)$, $C(X'_3, Y'_3)$, 通过该三点的曲率圆半径为 R_2 , 则由纯弯曲时的应变表达式:

$$\varepsilon = H / (R_2 - R_1) \quad (4)$$

式中: H 为隧道衬砌内层到其中性层的距离。可以得到隧道衬砌该单元的应变,利用该应变(应变作用效应)与衬砌的应变强度 ε_0 可建立隧道衬砌稳定的功能函数方程:

$$Z = G(\varepsilon_0, \varepsilon) = \varepsilon_0 - \varepsilon \quad (5)$$

隧道结构体系稳定可靠度即功能函数 $Z > 0$ 时的概率,其表达式为:

$$P_S = P(Z > 0) = \int_S f(x) dx = 1 - \int_F f(x) dx \quad (6)$$

$$\text{可靠度指标定义为: } \beta = \mu_z / \sigma_z \quad (7)$$

这里的 S 是可靠域, F 是失效域, S 与 F 的分界面称为破坏面或极限状态面。 $f(x)$ 为功能函数的概率密度函数, μ_z 为功能函数的均值, σ_z 为功能函数的标准差。

隧道结构体系稳定可靠性指标的计算方法可按《铁路工程结构可靠度设计统一标准》(GB50216—94)建议的分位值法进行,也可按

其它精确、简化的方法计算隧道结构体系的可靠性指标。

值得注意的是,此处的应变强度 ε_0 是由支护结构组成材料本身的力学性质决定。虽然对于不同的支护结构材料组成,其应变强度 ε_0 也是不同的,但针对具体的支护结构材料,无论岩土工程的力学参数带有多大的模糊性和不确定性,其应变强度 ε_0 是确定的。我们可以通过室内力学试验方法获得,并进行综合评定,这也是该方法的独到之处。

4 工程算例

京珠高速公路粤境小塘至甘塘段 E 标段

砭霜坳隧道的高程为 417 m,隧道的 PK62 + 790 断面分上下台阶开挖,上台阶的开挖日期为 1998 年 12 月 27 日,采用喷锚支护,喷砼厚度为 15 cm,打锚杆 13 根。测点埋设日期为 1998 年 12 月 27 日,三测点的埋设位置分别为:A 点设在拱顶,B、C 点分别设在距起拱线垂直距离 4.0 m 的两侧拱腰处。隧道现场监控量测记录见表 1。量测项目为拱顶下沉和周边收敛量测。

仅取 t_1 时刻 (1998. 12. 28) 和 t_2 时刻 (1998. 12. 29) 的两组数据进行算法验证,见表 2。

表 1 隧道现场监控量测记录表

测点号 \ 时刻	时刻						
	1998. 12. 28	1998. 12. 29	1998. 12. 30	1999. 01. 01	1999. 01. 02	1999. 01. 03	1999. 01. 04
A	424. 710	424. 705	424. 701	424. 698	424. 696 0	424. 694 0	424. 693 0
BC	9. 860 0	9. 859 5	9. 859 1	9. 858 8	9. 858 6	9. 858 5	9. 858 4

表 2 隧道喷锚支护结构可靠性分析计算简表

项目 \ 测点	坐标		曲率圆半径 /m		应变作用 效应 $\varepsilon / 10 \times 10^{-4}$	应变强度 ε_0		ABC 单元可靠度指标 β	
	T_1	T_2	R_1	R_2		抗拉 $/ 10 \times 10^{-4}$	抗压 $/ 10 \times 10^{-4}$	抗拉	抗压
	A	(0, 3. 710)	(0, 3. 705)	5. 130 6	5. 132 2	6. 615 45	4. 154 5	10. 4831	1. 743
B	(- 4. 930, 0)	(- 4. 929 75, 0)							
C	(4. 930, 0)	(4. 929 75, 0)							

注:应变作用效应、应变强度、喷层厚度均服从正态分布。

由验算可知:用该方法计算出的可靠度指标符合实际情况,而且简便易操作,可以直接、直观地与现场量测联系起来,真正体现隧道新奥法施工的信息反馈、指导施工和修正设计的动态设计特点。

5 总结

该方法在其强度应变 ε_0 获取方面还有一定的难度,支护材料不同,其强度应变 ε_0 是不同的,而且可能会随时间的变化有所改变,但对于隧道结构稳定可靠性分析方法较少的今

天,该方法仍不失为一次有益的尝试和积极的探索。

参 考 文 献

- 1 罗衍检. 铁路隧道结构设计理论与方法存在的问题. 世界隧道, 1997(5) 8~12.
- 2 牟瑞芳. 论隧道工程围岩稳定性及其可控制性. 铁道学报, 1996, 18(4) 82~85
- 3 中华人民共和国铁道部. TB10003-99 铁路隧道设计规范. 北京:中国铁道出版社, 1999. 380~395.

收稿日期 2000-07-10