

复杂条件下隧道支护体时效可靠性探讨

贾剑青^{1,2}, 王宏图¹, 李晓红¹, 牛惠民², 胡国忠¹

(1. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 兰州交通大学交通运输学院, 甘肃 兰州 730030)

摘要:以 Kelvin-Voigt 黏弹性模型作为大埋深隧道支护体流变模型, 推导了隧道支护体的位移时效方程; 提出了支护体时效可靠性的定义, 即支护体时效位移曲线 ($U_t(t_i)$) 与位移阈值的交点 (A 点) 到位移收敛值间弧段长 ($\widehat{AB}$) 与围岩与支护体发生作用点 (O 点) 与位移收敛点 (B 点) 之间弧段 ($\widehat{OB}$) 长的比值, 即就是 $p_t = \widehat{AB} / \widehat{OB}$ 。在此基础上, 运用自编程序计算了若干工程实例。工程实例表明: 支护体的破坏概率与支护体弹性模量 (E_2)、围岩弹性模量 (E_1) 以及支护厚度比较敏感; 随着围岩弹性模量的降低, 相同支护强度的支护体破坏率越小。

关键词: 隧道; 支护体; 时效可靠性; Kelvin-Voigt 模型

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)03-0390-04

作者简介: 贾剑青(1978-), 男, 博士, 主要从事隧道及地下空间工程、安全技术及工程方面的教学与科研工作。E-mail: htwang@cqu.edu.cn。

Time-reliability of tunnel support under complex conditions

JIA Jian-qing^{1,2}, WANG Hong-tu¹, LI Xiao-hong¹, NIU Hui-min², HU Guo-zhong¹

(1. Key Lab for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Hazard Control Engineering of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Kelvin-Voigt model was taken as the rheological model of large deep tunnel support, and the displacement time-equations of tunnel support were derived. The time-reliability of the tunnel support was defined, i.e., the ratio of the length of the arc AB and OB . The length of $\widehat{AB}$ was the distance between the intersection A , which was the displacement time-curve ($U_t(t_i)$) and the special value of displacement, and the displacement converging valve. The length of $\widehat{OB}$ referred to the distance between the action position O of surrounding rock and the support and the converging valve of displacement. On such a basis, some real projects were calculated using computer programs. The results show that the failure probability of the tunnel support is very sensitive to the elastic modulus of surrounding rock and the tunnel support, and it is also sensitive to the supporting height. The failure probability of the tunnel support with the same supporting strength will reduce when the elasticity of surrounding rocks reduces.

Key words: tunnel; support; time-reliability; Kelvin-Voigt model

0 引言

近年来, 在国内重大工程的建设中, 涉及到诸多特殊环境的隧道及地下空间工程问题, 如大埋深地下空间开发、深埋长大隧道建设、核废料的地下储存与处理及深部地下矿产资源开采等, 均涉及到大埋深及高应力等深部岩石力学问题, 岩体变形的时间效应^[1]将进一步显现。

工程实践、实测及试验均已表明, 隧道支护体在支护初期是稳定的, 但是随着掌子面的推进, 支护体在一定时期后, 可能会出现一定程度的破坏甚至坍塌, 也就是说, 隧道支护体的稳定性表现出显著的“时效”特征; 与我国隧道及地下空间工程的快速建设相共生

的隧道及地下工程结构物的耐久性问题^[2]日益显现。

目前, 国内外对隧道支护体的可靠性^[3]研究, 主要集中在“点”可靠性的研究上, 即就是研究隧道支护体在某个时间点的可靠度, 这与工程实际不相一致。只有对隧道支护体进行“时效”可靠性^[2, 4]的研究, 才能更接近工程实际。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50334060, 50474025, 50774106); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2005CB221502); 国家自然科学基金创新群体基金(50621403); 重庆市自然科学基金资助项目 (CSTC, 2006BB7147, 2006AA7002); 兰州交通大学自选课题资助项目 (40723)

收稿日期: 2007-07-20

在隧道的初期支护中, 主要的承载结构为喷射混凝土, 其他支护形式, 如锚杆及钢支撑等可通过变形等效法处理。由于混凝土支护内的应力一般都比较低, 通常情况下也不致产生塑性变形, 所以, 通常运用 Kelvin-Voigt 黏弹性流变模型^[4]作为隧道支护体的流变模型。

本文选用 Kelvin-Voigt 黏弹性流变模型作为支护体的流变模型, 就复杂条件下隧道支护体的时效可靠性问题进行初步探讨, 对处理相关隧道及地下空间工程问题有一定的借鉴意义。

1 隧道支护体黏弹性分析

1.1 支护体的流变特性

如果忽略龄期对混凝土蠕变特性的影响, 混凝土材料的蠕变特性用蠕变柔量^[4-6]可表示为

$$J(t, t_i) = \frac{1}{E} + c[1 - e^{-k(t-t_i)}] \quad (1)$$

式中 E 为混凝土的弹性模量; t_i 为混凝土材料的龄期; c, k 为与混凝土性质有关的常数; t 为计算时刻。

1.2 支护体黏弹性径向位移

在隧洞开挖后, 当应力释放到一定程度后施作初次支护, 围岩的持续变形将受到支护体系的约束, 围岩与支护体之间将产生相互作用力 $f(t_i)$ 。设 $f(t_i)$ 沿支护体受压的方向为正, 则隧洞围岩所受 $f(t_i)$ 的方向与洞室周边围岩上作用的径向力 $p(t)$ 的方向相反^[7-8]。由支护体蠕变柔量方程及弹性—黏弹性对应原理可知, 隧洞支护体从 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的黏弹性径向位移^[4, 8-9]为

$$u_r(t_2) = \frac{1+\mu}{\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)} \left[(2\mu-1)r - \frac{b^2}{r} \right] \left\{ \frac{f(t_2)}{E} - \int_{t_1}^{t_2} f(t_i) \frac{\partial}{\partial t_i} \left[\frac{1}{E} + c - ce^{-k(t_2-t_i)} \right] dt_i \right\} \quad (2)$$

式中 a 为隧洞毛洞半径; b 为隧洞支护后的半径; r 为隧洞支护体的任一点, 且 $a \leq r \leq b$; μ 为支护体泊松比。其余参数意义同前。

有关 $f(t_i)$ 解析表达式可参考文献[4, 9]。

2 隧道支护体时效可靠性计算

2.1 时效可靠性理论计算

隧道支护体的位移是在开挖和支护过程中, 在众多因素的影响下, 围岩整体力学性质及稳定状态最直接、最本质的客观表现^[10]。从位移出发研究隧道支护体的可靠性是众多学者认同的途径, 并且与国际隧道协会 (ITA) 推荐的“收敛—约束”模型^[10]思想相一

致。

根据传统的结构可靠性定义^[10-11], 本文定义隧道支护体时效可靠性为支护体位移时程曲线与位移阈值的交点到位移收敛值之间的弧长与围岩与支护体作用点到位移收敛点之间弧长的比率, 简单地说, 隧道支护体的时效可靠性即支护体的位移收敛值超过位移阈值的概率。其计算关系图式如图1所示。

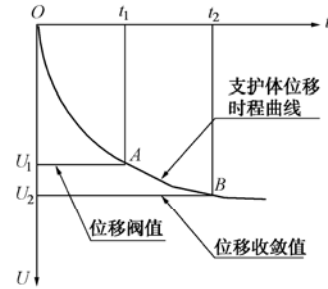


图1 支护体时效稳定性计算关系图

Fig. 1 The time-reliability calculation of tunnel support

设隧道支护体位移时程曲线为图1中的 $\widehat{OB}$ 段。由图1可知, 在隧洞支护后, 经过 t_2 时间段后, 支护体位移收敛于 U_2 ; 根据工程要求, 事先确定支护体的位移阈值 U_1 , 由本文关于支护体时效可靠性的定义知, 支护体的时效破坏概率为

$$p_f = \frac{\widehat{AB}}{\widehat{OB}} \quad (3)$$

因为

$$\widehat{AB} = \int_{t_1}^{t_2} U_r(t_i) \times \sqrt{1 + (U_r(t_i))^2} dt_i,$$

$$\widehat{OB} = \int_0^{t_2} U_r(t_i) \times \sqrt{1 + (U_r(t_i))^2} dt_i,$$

故

$$p_f = \frac{\widehat{AB}}{\widehat{OB}} = \frac{\int_0^{t_1} U_r(t_i) \times \sqrt{1 + (U_r(t_i))^2} dt_i}{\int_{t_1}^{t_2} U_r(t_i) \times \sqrt{1 + (U_r(t_i))^2} dt_i} \quad (4)$$

则支护体的时效可靠性可表示为

$$p_s = 1 - p_f = 1 - \frac{\widehat{AB}}{\widehat{OB}} = 1 - \frac{\int_0^{t_1} U_r(t_i) \times \sqrt{1 + (U_r(t_i))^2} dt_i}{\int_{t_1}^{t_2} U_r(t_i) \times \sqrt{1 + (U_r(t_i))^2} dt_i} \quad (5)$$

从上述的推导过程可以看出:

(1) 当隧道支护体的特征参数一定时, 只要根据工程要求设定一个位移阈值 U_1 , 便可求得支护体的“时效”可靠度。

(2) 对某一具体工程, 如果既定工程预期的可靠性指标 β_0 , 即就是确定 $\widehat{AB}/\widehat{OB}$ 的比值, 那么, A 点的位置就可以唯一的确定, 也就是说, 如果支护体的

表 1 围岩与支护体的特性参数及支护体破坏概率

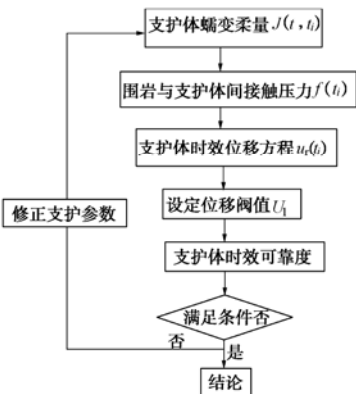
围岩特性参数				支护体特性参数					破坏概率 /%	收敛位移 /mm
E_1/GPa	c_1/Pa^{-1}	μ_1	$k_1/(\text{d}^{-1})$	E_2/GPa	c_2/Pa^{-1}	μ_2	$k_2/(\text{d}^{-1})$	h/cm	p_f	
10	0.05	0.30	0.02	40	0.0005	0.16	0.025	45	46.73	-137.4
—	—	—	—	50	—	—	—	—	35.21	-125.8
—	—	—	—	60	—	—	—	—	25.09	-115.8
8	—	—	—	50	—	—	—	—	27.37	-117.1
6	—	—	—	—	—	—	—	—	12.20	-107.6
4	—	—	—	—	—	—	—	—	0	-94.3
6	—	—	—	40	—	—	—	—	28.38	-118.4
4	—	—	—	—	—	—	—	—	3.40	-102.6
—	—	—	—	30	—	—	—	—	24.9	-115.7
2	—	—	—	—	—	—	—	—	0	-87.1
—	—	—	—	20	—	—	—	—	11.55	-107.0
1	—	—	—	20	—	—	—	—	0	-74.9

注：“—”表示该单元格数据与上一行相同；表中破坏概率是位移阈值为 100 mm 时所得。

可靠度要满足工程既定值，那么，支护体的时程曲线必须经过 A 点，此时，可通过反复试求支护体的支护参数，比如混凝土的弹模及支护厚度等，以满足工程预期的可靠度，这对修正隧道支护参数以及校核支护体的稳定性有着非常重要的意义。

2.2 时效可靠性计算流程

根据本文隧道支护体时效可靠性的定义，可编写计算机程序进行计算。其计算流程图如图 2 所示。



某深埋隧道埋深 800 m 左右，跨度 10 m，毛洞半径 $a=5.9$ m，支护后隧洞内半径 $b=5.6$ m，永久支护结构为混凝土结构，厚度 30 cm；围岩变形特性参数为： $E_1=1\times 10^3$ MPa， $\mu_1=0.3$ ， $c_1=5\times 10^{-3}$ MPa⁻¹， $k_1=0.02$

1/d；支护结构变形特性参数为： $E_2=2\times 10^4$ MPa， $\mu_2=0.16$ ， $c_2=5\times 10^{-5}$ MPa⁻¹， $k_2=0.025$ 1/d， $t_0=5\text{d}$ ， $t_1=5\text{d}$ 。

根据式（1）～（5），运用自编程序，求得混凝土的蠕变柔量为

$$J(t, t_i) = 0.5 \times 10^{-5} + 0.5 \times 10^{-5} (1 - e^{-0.025t_i})。$$

支护体的时效位移方程为

$$U_r(t_i) = -125.073 + 0.0882e^{-0.0501t_i} + 0.6795e^{-0.04558t_i} + 1.768e^{-0.0251t_i} - 1.256e^{-0.025t_i} + 123.87e^{-0.0206t_i}。$$

如果以支护体下沉 100 mm 为隧道支护体位移阈值，则其破坏概率为

$$p_f = \frac{\widehat{AB}}{\widehat{OB}} = 2068.03 / 7128.6 = 29.01\%。$$

为研究支护体时效可靠性与围岩及支护体特征参数之间的关系，对如表 1 所示围岩及支护参数下的隧道支护体破坏概率及位移收敛值进行计算，计算结果如表 1 所示。从表 1 的分析结果可以看出：

（1）随着支护强度及支护厚度的增加，隧道支护体的“时效”破坏概率将减小，但是其速率将减小，

4 结 论

（1）相关工程实例的理论计算结果与工程实际情况比较吻合，表明本文所定义的隧道支护体时效可靠

性的概念是正确的。

(2) 本文提出的隧道支护体时效可靠性的计算方法, 对求解支护体时效可靠性、校核及优化支护体的支护参数简单易行。

(3) 随着支护强度及支护厚度的增加, 隧道支护体的时效可靠性将进一步增加, 但其增长率减小。

参考文献:

- [1] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. The rheology and engineering using of rock and soil materials[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 吴 波, 刘维宁. 城市浅埋隧道施工性态的时空效应分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 340 - 343. (WU Bo, LIU Wei-ning. Analysis of space 2 time effect for urban shallow tunneling by excavatio[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 340 - 343. (in Chinese))
- [3] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. (ZHU Yu-xue. Analysis of slope stability[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. (in Chinese))
- [4] 孙 钧, 侯学渊. 地下结构(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 1991. (SUN Jun, HOU Xue-yuan. Underground structure[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))
- [5] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994. (CHEN Zi-ying. Analytical methods of the surrounding rocks mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [6] 刘宝国, 杜学东. 圆形洞室围岩与结构相互作用的黏弹性解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 561 - 564. (LIU Bao-guo, DU Xue-dong. Viscoelastical analysis on interaction between supporting structure and surrounding rocks of circle tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 561 - 564. (in Chinese))
- [7] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (ZHU Wei-shen, HE Man-chao. Stability of surrounding rocks and the moving constructing mechanics of rock masses under complicated situations[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [8] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. (WU Jia-long. Elastical mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987. (in Chinese))
- [9] 杨挺青. 黏弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990. (YANG Ting-qing. Viscoelastical mechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990.)
- [10] MAIR R J. Ground movement around shallow tunnels in soft clay[J]. Tunnels and Tunneling, 1982(6): 33 - 38.
- [11] 景诗庭, 朱永全. 隧道结构可靠度[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. (JING Shi-ting, ZHU Yong-quan. Stability of tunnel structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [12] 杨成永, 张 弥, 白小亮. 隧道喷混凝土衬砌结构可靠度分析的位移方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 266 - 269. (YANG Cheng-yong, ZHANG Mi, BAI Xiao-liang. Displacement-based method for reliability analysis of shotcrete lining of tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 266 - 269. (in Chinese))