

黄土铁路隧道衬砌结构可靠性分析与研究

牛泽林, 霍润科

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要:运营阶段的隧道,随着时间流失其结构是否依然安全可靠? 这一直以来都受到了人们关注. 而传统的安全系数法在这个阶段已不能发挥它的作用,那么对于施工后衬砌结构可靠性的检验方法也只能运用数理统计知识了. 但就其在现役隧道衬砌结构可靠性方面的应用成果来说,目前还比较少,这主要归咎于地下结构有太多的不确定性. 而且黄土隧道与其他地层的隧道在结构可靠性的研究成果存在着一定的不通用性. 因此,找到一个合理评价黄土隧道衬砌结构可靠性的方法是现阶段最主要的任务之一. 为此,本研究提出以 SIR-3000 地质雷达探测为手段,从实际衬砌厚度入手,应用概率统计知识对运营中的黄土隧道衬砌结构可靠性做出评价,同时,提出在保证必要的结构可靠概率条件下,通过减少施工时的衬砌厚度来降低施工成本的思路.

关键词:黄土地区;隧道;数理统计;衬砌;可靠度

中图分类号:U 451

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)02-0193-04

隧道衬砌结构可靠度的研究始于上世纪 70 年代. 到 80 年代以后,我国各高校和相关部委才逐渐开始了隧道与地下结构空间结构可靠性的探索. 关宝树教授(1989)利用数量化理论和模糊数学方法,提出了铁路隧道围岩分类的预测和判定标准^[1];谢锦昌教授等(1988)最先对单线铁路隧道的围岩塌方高度及衬砌所承受的松弛荷载进行概率统计分析,并对其概率分布函数进行了最佳拟合^[2],在随后的几年内进行了浅埋隧道、偏压隧道衬砌结构的可靠度分析^[3,4]. 张清教授(1994)对围岩弹性抗力系数进行了统计分析,并用随机有限元法计算了隧道衬砌结构的可靠度^[5];景诗庭教授(1996)对混凝土偏压构件进行了大量的试验,提出了混凝土受压构件偏心影响系数的统计参数计算公式,并对模糊可靠度和复合衬砌可靠度进行了研究^[6-7]. 到目前为止,虽然有一些关于隧道结构可靠性研究的论文和成果,但是由于地下结构作用机理复杂,地层情况千变万化,使得研究工作遇到不少困难,尤其对于已建成的、已投入使用的隧道来说,要很好的掌握它的结构是否安全可靠,更是难上加难. 这就是目前研究的一个主要课题之一. 从另一个方面来说,由于地层参数在不同地区具有明显的差异性,致使隧道结构可靠性的研究成果不像地面结构那样具有成果方面的通用性. 因此,本文认为对于隧道与地下结构空间的可靠性研究应该划地区的进行研究,结合以上理论和原因,本文将依托某一运营中的黄土隧道,来研究现役黄土隧道衬砌结构的安全可靠性,提出评价黄土隧道衬砌结构可靠性的具体思路和方法,同时对有关结论进行验证.

1 数据采样和统计分析

如何确定这些随机的试验数据或观测值的概型分布规律,这就要对其分布规律预先做出一种合理的假设 H_0 , 然后对其假设进行检验. 一般是采用经验法来确定概率分布的. 即对随机变量 X 的母体进行抽样试验,得子样 X_1, X_2, \dots, X_n , 绘出子样频率直方图,然后凭观察确定用某一分布来拟合它. 也就是用子样的假设分布来代替母体的分布. 那么这个假设分布是否合适,必须加以检验,即进行所谓统计假设检验.

假设检验的方法很多,皮尔逊(χ^2) 检验法与 $K-S$ 检验法,它们均属于大子样情况下的检验,且不受假设分布函数的限制. 考虑到两个检验方法的计算精度,本文拟采用 $K-S$ 检验法^[8-9]. $K-S$ 分布检验法的

收稿日期:2011-11-17 修改稿日期:2012-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172237)

作者简介:牛泽林(1978-),男,甘肃静宁人,讲师,博士研究生,从事隧道与地下结构工程的教学与科研.

基本思路是依据子样数据得到经验分布函数 $F_n(X)$, 然后将其与原假设的总体分布函数 $F(x)$ 进行合理比较, 接着建立统计量 D_n , 详见式(1). 最后, 在置信度 α 被给定的情况下, 将从柯尔莫哥洛夫检验临界值 $D_{n,\alpha}$ 表查到得的临界值 $D_{n,\alpha}$ 与计算得来的 $Dn(x)$ 最大值进行比较, 判断原假设是否被拒绝.

$$D_n = \max_{-\infty < t < \infty} |F_n(x) - F(x)| = \max_{-\infty < t < \infty} D_n(x) \quad (1)$$

如果 $D < D_{n,\alpha}$, 则不能拒绝原假设; 如果 $D > D_{n,\alpha}$, 则拒绝接受原假设.

1.1 数据采用

本文利用美国 GSSI 公司生产的 SIR-3000 地质雷达(天线中心频率为 900 MHz)对运营中的秦东黄土隧道的衬砌厚度进行了详细探测. 具体技术参数如下: 采集时窗为 30ns; 扫描速率为 64 扫描线/s; 滤波器 HP 为 225 MHz; 滤波器 LP 为 1 800 MHz. 混凝土衬砌介电常数为 5.8, 电磁波速度为 0.125 m/ns, 采用连续探测方式. 为保证更好的说明问题, 全线 IV 围岩段共分了 144 个断面, V 围岩段共分了 20 测量断面进行探测, 每一个断面布置五根测线, 他们分别在拱顶、左右拱腰、左右拱脚处. 每一个断面的衬砌厚度是这五处测量值的平均值, 部分断面的最终隧道衬砌厚度值汇总于表 1 和表 2 中.

表 1 IV 级围岩段衬砌厚度汇总表(cm)

Tab. 1 Summarized lining thickness (cm) in surrounding rock of Grade IV

断面编号	衬砌厚度	断面编号	衬砌厚度	断面编号	衬砌厚度	断面编号	衬砌厚度	断面编号	衬砌厚度
1	56.00	51	55.00	81	58.00	121	56.00	135	55.00
2	56.00	52	57.00	82	59.00	122	56.00	136	55.00
3	58.00	53	61.00	83	57.00	123	62.00	137	58.00
4	57.00	54	56.00	84	53.00	124	54.00	138	55.00
5	57.00	55	54.00	85	52.00	125	57.00	139	49.00
6	57.00	56	55.00	86	57.00	126	54.00	140	55.00
7	56.00	57	59.00	87	55.00	127	51.00	141	59.00
8	60.00	58	59.00	88	51.00	128	51.00	142	51.00
9	54.00	59	53.00	89	56.00	129	58.00	143	57.00
10	56.00	60	53.00	90	50.00	130	54.00	144	56.00

1.2 数据统计分析

根据衬砌厚度汇总表 1 和表 2, 并结合数理统计方法, 研发隧道衬砌厚度统计特征的计算程序, 最终将计算结果汇总于表 3.

根据随机变量的处理方法, 应先绘制这些数据的频率直方图, 然后进行直观的判断. 具体为: 横坐标表示分组区间, 纵坐标表示数据出现频率, 绘出直方图, 图 1 和图 2 分别为不同围岩段内衬砌厚度频率直方图.

从所绘制的隧道衬砌厚度直方图的特征来看, 可以初步假设该隧道衬砌厚度的概率分布类型均应符合正态分布, 接着本文用 K-S 检验法进行假设检验. 取显著水平 $\alpha=5\%$, 同时, 对 IV 围岩段和 V 围岩段内的衬砌厚度分布类型提出服从正态分布的假设 $D_0(IV)$ 、 $D_0(V)$, 经计算它们的统计量分别为: $D(IV)$ 等于 0.10、 $D(V)$ 等于 0.11, 详见表 4 和表 5. 查柯尔莫哥洛夫检验临界值表得到它们临界统计量分别为: $D_{144,0.05}(IV)$ 等于 0.11、 $D_{20,0.05}(V)$ 等于 0.29, 显然 $D(IV) < D_{144,0.05}(IV)$ 、 $D(IV) < D_{20,0.05}(IV)$, 因此, 可得出该隧道厚度的概率分布类型均服从正态分布.

表 2 V 级围岩段衬砌厚度汇总表(cm)

Tab. 2 Summarized lining thickness in surrounding rock of Grade V

断面编号	衬砌厚度	断面编号	衬砌厚度	断面编号	衬砌厚度	断面编号	衬砌厚度
1	70.00	6	69.00	11	67.00	16	67.00
2	76.00	7	62.00	12	67.00	17	69.00
3	70.00	8	65.00	13	68.00	18	69.00
4	64.00	9	61.00	14	66.00	19	64.00
5	73.00	10	67.00	15	64.00	20	63.00

表 3 各围岩段衬砌的统计特征

Tab. 3 Characteristics of lining in the different surrounding rocks

统计特征	隧道 IV 围岩段	隧道 V 围岩段
均值/cm	55.87	67.05
标准差 /cm	2.54	3.67
变异系数	0.05	0.05

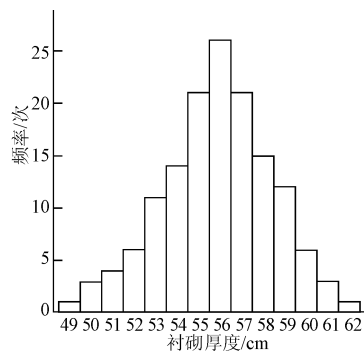


图 1 IV 级围岩段衬砌厚度直方图

Fig. 1 Distribution histogram of tunnel lining thickness in surrounding rock of Grade IV

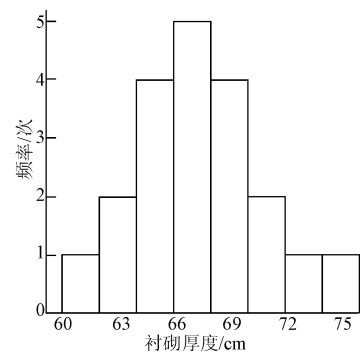


图 2 V 级围岩段衬砌厚度直方图

Fig. 2 Distribution histogram of tunnel lining thickness in surrounding rock of Grade V

表 4 IV 级围岩段衬砌统计量计算表

Tab. 4 Calculation of lining statistics in surrounding rock of Grade IV

衬砌厚度/cm	频数	累计频率	正态分布(概率)	累计频率	统计量 D_n	衬砌厚度/cm	频数	累计频率	正态分布(概率)	累计频率	统计量 D_n
49.00	1	1	0.002 926	0.006 944	0.004 018	56.00	26	86	0.500 000	0.597 222	0.097 222
50.00	3	4	0.009 083	0.027 778	0.018 694	57.00	21	107	0.653 099	0.743 056	0.089 957
51.00	4	8	0.024 505	0.055 556	0.031 051	58.00	15	122	0.784 477	0.847 222	0.062 746
52.00	6	14	0.057 651	0.097 222	0.039 571	59.00	12	134	0.881 219	0.930 556	0.049 337
53.00	11	25	0.118 781	0.173 611	0.054 830	60.00	6	140	0.942 349	0.972 222	0.029 873
54.00	14	39	0.215 523	0.270 833	0.055 310	61.00	3	143	0.975 495	0.993 056	0.017 561
55.00	21	60	0.346 901	0.416 667	0.069 766	62.00	1	144	0.990 917	1.000 000	0.009 083

表 5 V 级围岩段衬砌统计量计算表

Tab. 5 Calculation of lining statistics in surrounding rock of Grade V

衬砌厚度/cm	频数	累计频率	正态分布(概率)	累计频率	统计量 D_n	衬砌厚度/cm	频数	累计频率	正态分布(概率)	累计频率	统计量 D_n
61.00	1	1	0.051 040	0.05	0.001 040	67.00	4	12	0.500 000	0.60	0.100 000
62.00	1	2	0.086 540	0.10	0.013 460	68.00	1	13	0.607 370	0.65	0.042 630
63.00	1	3	0.137 870	0.15	0.012 130	69.00	3	16	0.707 110	0.80	0.092 890
64.00	3	6	0.206 840	0.30	0.093 160	70.00	2	18	0.793 160	0.90	0.106 840
65.00	1	7	0.292 890	0.35	0.057 110	73.00	1	19	0.948 960	0.95	0.001 040
66.00	1	8	0.392 630	0.40	0.007 370	76.00	1	20	0.992 900	1.00	0.007 100

2 隧道衬砌的可靠度分析

2.1 可靠度计算方法

在工程中评价结构的可靠度,一般直接采用结构可靠性指标 β 来衡量. 其功能函数可设为 $Z = R - S^{[8-9]}$.

根据可靠性理论,当只有 R 、 S 两个综合变量,且 R 、 S 为相互独立的正态分布变量时,其相应的可靠指标按(3)式计算,即

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

(3)

式中: μ_R, μ_S 分别为 R 和 S 的均值; σ_R, σ_S 分别为 R 和 S 的标准差.

2.2 衬砌的可靠度计算

对于隧道衬砌结构可靠性分析采用公式(3). 其中: μ_s 衬砌实际厚度的平均值; μ_R 为衬砌设计厚度的平均值,在 IV 围岩地层中衬砌的厚度设计值为 50 cm,而在 V 围岩地层中衬砌的厚度设计值为 60 cm; σ_R 为衬砌实际厚度的标准差, σ_s 为衬砌设计厚度的标准差,此时可以认为它等于零. 结构的可靠性指标和可靠概率计算如下:

(1) IV 围岩段衬砌结构可靠指标的计算

$$\beta_{IV} = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{56 - 50}{\sqrt{2.54^2}} = 2.36$$

$$P_s = 1 - P_f = 1 - \Phi(-\beta_{IV}) = 1 - \Phi(-2.36) = \Phi(2.36) = 0.9909 \approx 0.99$$

(2) V 围岩段衬砌结构可靠指标的计算

$$\beta_V = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{67 - 60}{\sqrt{3.67^2}} = 1.92$$

$$P_s = 1 - P_f = 1 - \Phi(-\beta_V) = 1 - \Phi(-1.92) = \Phi(1.92) = 0.9726 \approx 0.97$$

从分析结果来看, V 级围岩段内的隧道衬砌结构的可靠指标 β 有点小, 但是它们的可靠性概率都是比较大的, 均能大于本文希望达到的 95%, 故这座隧道结构是安全、可靠的。同时, 从置信度的角度考虑, 只要结构的可靠概率大于 95%, 就可以相信这个工程结构是安全可靠的。故可设这个隧道衬砌结构的可靠概率均为 95%, 来反求这个黄土隧道衬砌结构的平均最小施工厚度。通过计算, 在保证可靠概率为 95% 的情况下, 它们衬砌的平均最小施工厚度分别为 54 cm 和 66 cm, 也就是说按照这样的尺寸进行施工就可以保证结构的可靠性, 从隧道施工成本上来讲, 在施工时只要注意控制衬砌厚度的标准差和变异系数, 衬砌厚度在施工时每 10 m 就可以减少 1 cm 的混凝土用量, 而整个隧道(6 784 m)在 IV 和 V 级围岩段的衬砌施工中就可以节省约 678 m³ 的混凝土, 相当于节省工程成本 271 360 元。

3 结 论

(1) 根据上面的分析结果可以得出, 黄土隧道衬砌厚度的概率分布类型也是服从正态分布的。

(2) 本文通过黄土隧道衬砌结构可靠性的分析研究, 提出在充分保证结构可靠性的前提下, 可以通过减少衬砌施工尺寸来有效的较低施工程成本。当然, 在施工时, 控制结构尺寸的标准差、变异系数以及超挖也是必须。

(3) 实践证明, 利用隧道衬砌结构厚度来评价隧道结构可靠度要比传统方法, 更加适合于对现役隧道衬砌结构的可靠性进行安全评估工作。

(4) 为了保证对结构做出的可靠性评价准确、可信, 数据的采集和计算工作必须严谨对待。

参考文献 References

- [1] 关宝树. 铁路隧道围岩分类的定量化研究[R]. 成都: 西南交通大学, 1996.
GUAN Bao-shu. Railway tunnel classification of surrounding rocks the quantitative research[R]. Chengdu: South-west jiaotong university, 1996.
- [2] XIE Jin-chang, TAN Zhong-sheng. Optimum fit for the probability distribution function of loosened rock load on railway tunnel lining in china[J]. Proceedings of the International Congress, 1990: 627-632.
- [3] 谢锦昌. 铁路隧道衬砌结构可靠性分析初探[J]. 铁道学报, 1992, 1(1): 63-68.
XIE Jin-chang. Railway tunnel lining structure reliability analysis research [J]. Journal of railway, 1992, 1(1): 63-68.
- [4] 谢锦昌, 王 兵. 浅埋隧道荷载的试验研究[J]. 铁道标准设计, 1995, 1(11): 27-30.
XIE Jin-chang, WANG Bing. In the shallow tunnel in the study also test[J]. railway standard design, 1995, 1(11): 27-30.
- [5] 张 清. 铁路隧道衬砌结构可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 3(9): 209-218.
ZHANG Qing. Railway tunnel lining structure reliability analysis[J]. Rock mechanics and engineering journal, 1994, 3(9): 209-218.
- [6] 景诗庭. 地下结构可靠度分析研究之进展[J]. 石家庄铁道学院学报, 1995(2): 13-19.
JING Shi-ting. Underground structure reliability analysis research progress[J]. Shijiazhuang railway journal, 1995 (2): 13-19.
- [7] 景诗庭, 朱永全, 冯卫星. 混凝土偏压构件抗压强度试验研究[J]. 铁道学报, 1996, 18(5): 91-97.
JING Shi-ting, ZHU Yong-quan, FENG Wei-xing. The compressive strength of concrete component bias test re-search[J]. Journal of railway, 1996, 18(5): 91-97.

- [8] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京:人民交通出版社,1990.
WU Shi-wei. Structure reliability analysis[M]. Beijing:People's traffic press,1990.
- [9] 景诗庭. 隧道结构可靠度[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
JING Shi-ting. The tunnel structure reliability[M]. Beijing:China railway publishing house,2002.

Reliability analysis on the lining structure of loess railway tunnel

NIU Ze-lin, HUO Run-ke

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: As a used tunnel, is its structure safe and reliable with time passing by? This has been paid close attention to by the people. In view of the fact that the method of the traditional safety coefficient already can't play a role, the inspection method on the reliability of the lining structure can only use the knowledge of mathematical statistics. But it is more less in term of the application results about the reliability of lining structure at present, this is blamed on the underground structure since it has too much uncertainty. And the loess tunnel has certainly not been universal in the research results of the structure reliability with the tunnel of the other strata. So at the present stage, one of the main tasks is to find a reasonable evaluation method of loess tunnel lining structure's reliability. Therefore, this paper offers SIR-3000 geological radar detection as the means, from real thickness of the lining, and applies probability and statistics knowledge for operation of loess tunnel lining structure reliability to make evaluation. At the same time, this paper puts forward an iclea about reducing the construction cost by reducing the thickness to in the condition of ensuring the reliability necessary for the structure.

Key words: loess areas; tunnel; mathematical statistics; lining; reliability

Biography: NIU Ze-lin. Lecturer, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-15591859597, E-mail:nz1109109@163.com

(上接第 192 页)

Modal analysis of prestressed concrete beam with finite element software

LI Rui-ge¹, YANG Guo-li¹, ZHANG Yao-ting²

(1. Taizhou University, Taizhou 318000, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to create the modal analysis finite element model of prestressed concrete beams, a new analysis method has been proposed by the example of ANSYS finite element software. The prestressing force of beam is used by initial strain when the prestressed concrete beam modal is analyzed with finite element software. The prestressing force influence of the beam is changed to the impact of element materials elastic modulus. The frequencies and modals of prestressed concrete beams using ANSYS procedure is analyzed by varied modulus. The calculated natural frequencies at all levels prestressing force fit close with the experimental results. It shows that the modified finite element analysis model is feasible.

Key words: ANSYS; prestressed concrete beam; frequency; modal

Biography: LI Rui-ge, Associate Professor, Ph. D., Taizhou 318000, P. R. China, Tel:0086-13666899576, Email: lrg@tzc.edu.cn