

单线电气化铁路隧道衬砌结构 目标可靠指标的试算分析

宋玉香 景诗庭 刘勇
(石家庄铁道学院 石家庄 050043)

摘要 根据可靠性理论的基本原则和方法,按现行隧道设计规范所采用的“荷载-结构”模型,对单线电气化铁路隧道衬砌结构进行可靠性分析,并用“校准法”对目标可靠指标进行试算,得出目标可靠指标的建议值。

关键词 隧道衬砌,目标可靠指标,校准法

分类号 U452.21

1 引言

我国以可靠性理论为基础修订铁路隧道设计规范的工作正在进行,在可行性和基础性研究方面已取得若干重大进展。在隧道设计规范修订过程中,确定目标可靠指标是一个不可避免而又重要的问题。本文根据可靠性理论基本原则和方法,按现行规范采用的“荷载-结构”模型,采用各铁路院校在“以可靠性理论修订隧道设计规范的基础性研究”中取得的成果,对单线电气化铁路隧道衬砌结构目标可靠指标进行试算,为今后铁路隧道设计规范修正工作奠定了基础。

2 结构目标可靠指标选定的“校准法”

根据文[1]推荐,结构目标可靠指标由“校准法”选定。“校准法”要求所用的基本变量的设计值采用新规范的规定值,其计算步骤为:根据目标可靠指标的适用范围选择一组具有代表性的结构构件作为“校准法”的计算对象;在这一组结构构件中按其在工程中用量的多少和重要性的不同,确定其权系数 α_i ,确定各结构构件的作用效应和抗力中各基本变量的概率分布类型和设计参数;分别计算按现行设计规范设计的各结构构件的失效概率 P_i ;将求得各结构构件的失效概率 P_i 乘以权系数,即为按现行规范

设计的各种结构的平均失效概率 \bar{P} :

$$\bar{P} = \sum \alpha_i P_i \quad (1)$$

按下式计算结构的目标可靠指标:

$$R_{\text{nom}} = \frac{1}{\bar{P}} (1 - \bar{P}_f) \quad (2)$$

式中: R_{nom} ——结构的目标可靠指标。

本次试算采用铁道部专业设计院编制的“专隧0012单线电气化铁路隧道标准设计图”。我国应用此标准设计已修建了数千座隧道,目前大都在正常使用,它们的安全度符合原规范的要求,可以作为“校准法”的主要对象。

3 隧道衬砌结构可靠性分析

3.1 计算模型及功能函数

本文采用现行铁路隧道标准设计所采用的“荷载-结构”模型,将围岩的力学性能、塌方荷载、初砌材料的力学性能、初砌几何尺寸及自重、计算模式等视为基本随机变量,以截面压坏为承载能力极限状态,而将开裂视为正常使用极限状态。按目前通用的广义结构抗力 R 和广义作用效应 S 视为基本变量的 $R-S$ 模式,取衬砌结构的功能函数为

$$Z = G(R, S) = R - S \quad (3)$$

根据文[2]的建议,隧道衬砌结构偏压构件的检算公式为

1997年4月1日收到初稿,1997年8月2日收到修改稿。

作者 宋玉香 简介:女,28岁,硕士,1992年毕业于石家庄铁道学院铁道建筑系隧道与地下工程专业,现任讲师,主要从事科研与教学方面的工作。

截面压坏时承载能力:

$$N = f_{cc} b d \quad (4)$$

截面开裂时承载能力:

$$N = \frac{p f_{ct} b d}{6(e_0/d) - 1} \quad (5)$$

式中: N —— 荷载设计值产生的轴向力, 即作用效应;

—— 稳定系数, 对衬砌取 1.0;

b, d —— 衬砌截面的宽度和厚度, $b = 1.0$

m;

f_{cc} —— 混凝土单轴抗压强度设计值;

—— 偏心影响系数;

p —— 混凝土截面抵抗矩系数, 取为 1.75;

f_{ct} —— 混凝土抗拉强度设计值;

e_0 —— 轴向力偏心距。

式(4), (5) 右边各项即为广义抗力。

根据“校准法”的要求, 在对隧道衬砌结构进行可靠性分析时采用的计算图式, 与现行单线电气化铁路隧道标准设计所采用的计算图式一致, 如图 1 所示。荷载类型为匀布荷载、偏载以及马鞍形荷载^[3]。

3.2 用 Monte-Carlo 方法分析隧道衬砌作用效应的统计特征

3.2.1 基本随机变量的统计特征

塌方高度 H 的统计特征采用西南交通大学对各类围岩共 1 025 个塌方数据^[4], 根据围岩类别进行分析的结果。弹性抗力系数 K 和侧压力系数 λ 的统计特征由于缺乏足够资料, 本文暂根据现行隧道规范^[3] 规定的取值范围和文 [1] 所推荐的在已知随机变量上、下限条件下求其统计参数的估算方法予以确定, H, K 以及 λ 的统计特征如表 1 所示。

根据文 [4], 围岩容重的变异系数很小, 在计算中将忽略其变异性, 视其为常量, 其取值采用现行隧道规范范围的中间值。混凝土容重 γ_c 的统计特征, 见文 [5], 其分布为正态分布, 均值为规范标准值, 变异系数为 0.02。隧道衬砌几何尺寸变异性, 根据文 [6], 衬砌厚度变异是几何尺寸变异的主要因素, 本文在计算中衬砌厚度的均值取标准图的设计厚度, 变异系数取 0.15, 分布类型为正态分布。

对于混凝土弹性模量 E 的统计参数, 参考桥梁系统的统计资料, 当混凝土标号为 C20 时, 其均值为 27×10^3 MPa, 变异系数为 0.085 3, 服从正态分布。

计算模式的不定性在参考有关文献及计算经验

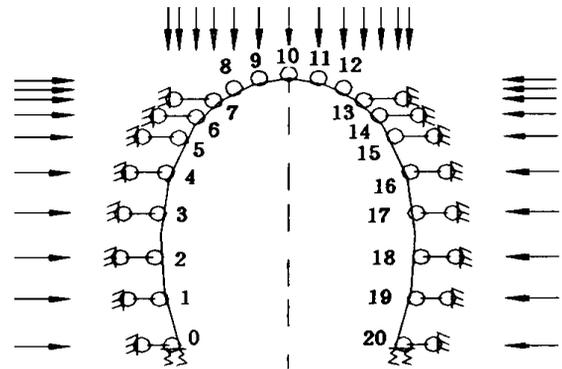


图 1 计算模式图
Fig. 1 Model for calculation

基础上, 暂取均值为 1.0, 变异系数为 0.2, 按正态分布。

3.2.2 用 Monte-Carlo 法对作用效应进行统计分析

Monte-Carlo 法是随机抽样技巧法。我们编写了用 Monte-Carlo 法求解作用效应统计特征的程序。本文采用这个程序, 对 \sim 类围岩标准设计断面, 在各种荷载组合下, 求出各截面轴力 N 和偏心距 e_0 的均值、标准差及变异系数, 采用 χ^2 检验法对轴力 N 的概率分布按对数正态和极值型分布进行假设检验, 其检验结果见表 2。

由表 2 可知, 轴力 N 服从对数正态分布。

3.3 衬砌结构抗力统计特征

影响结构抗力 R 统计参数的主要因素包括: 材料强度标准值 f_{ck}, f_{tk} , 几何尺寸 b, d 及计算公式的不确定性。用式 (6) 来表达这一系列不确定因素影响为

$$R = f_a R_k \quad (6)$$

故

$$\mu_R = R_k \mu_f \mu_a \quad (7)$$

$$R = (\sigma_f^2 + \sigma_a^2 + \sigma_{\mu_f}^2)^{1/2} \quad (8)$$

式中: f —— 材料性能不定性, 其均值 μ_f , 变异系数 σ_f ;

a —— 结构几何参数的不定性, 其均值 μ_a , 变异系数 σ_a ;

—— 计算公式的不确定性, 其均值 μ , 变异系数 σ 。

抗力概率分布因系几项系数相乘, 故一般认为服从对数正态分布。

表 1 各类围岩荷载及弹性抗力统计特征

Table 1 Statistical characters of loads and resistance

围岩类别	塌方高度 H			弹性抗力系数 K			侧压力系数		
	均值/m	变异系数	分布类型	均值/ $N \cdot m^{-3}$	变异系数	分布类型	均值	变异系数	分布类型
	14.524	0.9127	对数	66.67×10^6	11.78×10^6	对数	0.6667	0.177	对数
	9.1722	0.8387	正态	133.3×10^6	23.57×10^6	正态	0.3667	0.128	正态
	4.2504	0.6983	分布	300.0×10^6	70.71×10^6	分布	0.2000	0.177	分布
	2.8289	0.6363	布	733.3×10^6	164.90×10^6	布	0.0750	0.500	布
	1.7099	0.5924		1400.0×10^6	141.40×10^6		0.0000		
	0.9553	0.7177		1467.0×10^6	235.70×10^6		0.0000		

表 2 轴力概率分布假设检验

Table 2 Hypothesis testing result of axial force s probability distribution

围岩类别	统计量 D_n		临界值 D	检验结果	
	对数正态分布	极值型分布		对数正态分布	极值型分布
	11.01	极大	19.68	接受	拒绝
	8.30	极大	19.68	接受	拒绝
	14.35	极大	16.92	接受	拒绝
	15.64	极大	16.92	接受	拒绝
	12.65	极大	15.51	接受	拒绝

3.4 隧道衬砌结构可靠指标 的计算

根据上述作用效应及抗力统计结果,用文[1]推荐的分位值法对各类围岩在各种荷载作用下的衬砌结构进行可靠度分析,得出控制截面的 值如表 3 和表 4。

根据控制截面可靠指标 值,由式(9)计算控制截面的失效概率 P_f 值。

$$P_f = \Phi^{-1}(\dots) \quad (9)$$

4 单线电气化隧道衬砌结构目标可靠指标的试算

根据各类围岩标准图在现场用量的多少和重要性,考虑到实际现场对 类围岩都作专门设计,加了钢筋格栅,极少采用素混凝土的标准设计,另外今后的围岩分类也将对 类围岩另行处理,故 类围岩的权系数取为 0。各类围岩断面图的权系数 i 示于表 5。

根据以上结果,由式(1)算得平均失效概率 \bar{P}_f ,再由式(2)得平均可靠指标,所得结果如下:

(1) 当只计及均布荷载时,平均可靠指标为

表 3 只考虑截面压坏,不考虑截面开裂的控制截面可靠指标

Table 3 Reliability indices of control section under the condition of compression

围岩类别	均载	偏载	马鞍形荷载
	2.23	2.12	
	3.01	3.08	
(曲)	4.24	4.35	4.51
(直)	3.88	3.62	4.36
	5.06	4.87	5.03
	5.86	5.38	5.62

表 4 同时考虑截面开裂及压坏的控制截面可靠指标

Table 4 Reliability indices of control section under the condition of compression and crack

围岩类别	均载	偏载	马鞍形荷载
	0.40	0.38	
	2.40	2.33	
(曲)	3.57	3.46	3.69
(直)	3.18	3.08	3.42
	4.70	4.24	4.84
	5.86	4.69	5.62

表 5 各类围岩标准图的权系数
Table 5 Weight of standard figures for
different types of rock

围岩类别	权系数 α_i
	0.00
	0.10
	0.32
	0.42
	0.16

只考虑截面压坏: $\bar{R} = 3.620$

同时计及截面开裂及压坏: $\bar{R} = 3.074$

(2) 当计及各种荷载, 对于每类围岩取失效概率的最大值时, 平均可靠指标为

只计及截面压坏: $\bar{R} = 3.571$

同时计及截面开裂及压坏: $\bar{R} = 3.006$

5 讨论与建议

(1) 用 Monte-Carlo 法对隧道衬砌结构作用效应的分析统计表明, 荷载效应服从对数正态分布, 与塌方高度的概率分布一致, 符合一般规律。

(2) 对单线电气化铁路隧道衬砌标准设计进行可靠度分析表明, 各类围岩衬砌标准设计可靠指标相差较大。围岩类型愈低, 衬砌的失效概率愈高, 这与现场调查宏观统计结果相符。

(3) 不考虑 III 类围岩时单线电气化铁路隧道衬砌抗压破坏的加权平均可靠指标达 3.6 左右, 代表着我国现行隧道衬砌结构的一般水平, 与建筑结构

中钢筋混凝土轴心受压和大偏心受压构件的可靠度水平相近^[7]。

(4) 关于抗开裂的目标可靠指标, 算得的加权平均可靠指标较高, 考虑到影响开裂的因素较为复杂, 不易完全通过计算分析实现控制。目前正常使用极限状态的目标可靠指标都定得较低, 我们建议定为 2.0。目前标准设计除 III 类围岩外都能满足, 但仍要强调加强质量控制的各项措施。

(5) 隧道衬砌结构可靠性分析依靠全面的尽量符合实际的统计资料, 目前虽已作了大量的工作, 但各基本随机变量的统计结果还没有达到完全满足要求的程度, 一些重要参数还只能参照现行规范取值, 分布规律也据经验假定。提高、完善的工作量还很大。

参 考 文 献

- 1 国家技术监督局 1994-09 发布. 铁路工程结构可靠度设计统一标准 GB50216-94. 北京: 中国计划出版社, 1994, 34~41
- 2 石家庄铁道学院. 隧道衬砌混凝土偏压构件抗压强度统计特征及抗力计算公式的试验研究—“以可靠性理论修订隧道设计规范的基础性研究之四”. 1996, 9
- 3 铁路隧道设计规范 TBJ3-85. 北京: 中国铁道出版社, 1986
- 4 西南交通大学. 深埋隧道荷载统计特征的研究—“以可靠性理论修订隧道设计规范的基础性研究之一”. 1996, 9: 15~18
- 5 吴世伟著. 结构安全度与可靠度分析论文集. 南京: 河海大学出版社, 1987, 81~93
- 6 长沙铁道学院. 铁路隧道衬砌几何尺寸变异的结构可靠度分析—“以可靠性理论修订隧道设计规范的基础性研究之五”. 1996, 9: 1~9
- 7 中国建筑研究院主编, 国家计委批准. 建筑结构设计统一标准 GBJ68-84. 北京: 建筑工业出版社, 1984, 69~70

CALCULATION OF OBJECT RELIABILITY INDEX OF TUNNEL LINING STRUCTURE FOR SINGLE-TRACK ELECTRIFICATION RAILWAY

Song Yuxiang Jing Shiting Liu Yong

(Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043)

Abstract Based on the basic principle and method of reliability theory, by means of so called action-and-reaction model used in the present tunnel design specifications, the reliability of tunnel lining structure for single-track electrification railway is studied and the suggested value of the object reliability index is figured out by using the calibration method.

Key words tunnel lining, object reliability index, calibration method