

文章编号:1006-2106(2015)10-0093-05

铁路隧道洞门目标可靠度及分项系数确定方法^{*}

周佳媚^{**} 蒙国往 高 波 严 启

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要:研究目的:铁路隧道洞门受力复杂、断面变化大,洞门可靠度研究少。研究隧道洞门目标可靠度及分项系数计算方法可为铁路隧道洞门的可靠度设计提供参考。

研究结论:(1)目标可靠指标由各极限状态中最小的可靠指标决定,目标可靠度分项系数基于目标可靠指标求得;(2)目标可靠指标计算中,不同计算方法计算结果有差异,通过对三种适用于铁路隧道洞门目标可靠指标计算方法进行分析比较和结合实例计算,认为分位值法相对比较简便实用,可用于隧道洞门目标可靠指标的计算;(3)明确了分位值法计算铁路隧道洞门目标可靠指标分项系数的详细计算过程,并通过实例计算验证了分位值法计算分项系数的可行性;(4)土压力分项系数对铁路隧道洞门各极限状态均有影响且最大,因此应加强隧道洞门土压力统计特征研究;(5)本文提出的铁路隧道洞门目标可靠度及分项系数确定方法,可直接用于铁路隧道洞门结构设计。

关键词:隧道洞门;可靠度;分项系数;分位值法

中图分类号:U451 文献标识码:A

Method for Determining Target Reliability and Partial Coefficient of Railway Tunnel Portal

ZHOU Jia - mei, MENG Guo - wang, GAO Bo, YAN Qi

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Research purposes: There is a little research on the reliability of railway tunnel portal structure because of large section and complicated mechanical behaviors. The analysis process and calculation method can provide some references for the reliability design of railway tunnel portal.

Research conclusions: (1) The objective reliability index is dominated by the smallest one of the whole possible failure modes. Partial coefficient can be calculated based on a given target reliability index. (2) Reliability index values are different when computed by different methods. Based on calculation methods and calculation example, contribution value method is considered more accurate, handy and practical when compared with the result from the other computational methods. Contribution value method is recommended as the best calculation way for the target reliability index for tunnel portal structure. (3) The processes of contribution value method for partial coefficient are described, and the mathematical description of the method is given clearly. Contribution value method is proved to be feasible through the calculation example. (4) Among five partial coefficients, the greatest impact to the limit state of tunnel portal structure is the partial coefficients of coefficient of earth pressure. So the study of statistical character for soil pressure should be enhanced. (5) The method for determining target reliability and partial coefficient of railway tunnel portal can directly

^{*} 收稿日期:2015-06-30

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划(2012G014-D)

^{**} 作者简介:周佳媚,1973年出生,女,教授。

be applied to the design of railway tunnel portal structure.

Key words: tunnel portal; reliability; partial coefficient; contribution value method

地下结构可靠性研究中,由于结构和岩土之间的相互作用复杂,结构周围介质的工程性质难以清楚确定,导致研究难度大,致使地下结构可靠度研究一直落后于地面结构可靠度研究。

1994 年,姚明初等在《铁路工程结构可靠度设计统一标准》中提出结构极限状态设计式分项系数选定的计算方法^[1]。1995 年,景诗庭对地下结构可靠度分析研究的进展进行了介绍^[2]。目前,我国铁路隧道设计已进入近似概率设计阶段^[3],但是目前的研究仅限于单线铁路隧道,对于双线、多线及高速铁路隧道未进行深入研究,仍然采用安全系数法,这使得这些结构的可靠度设计还达不到实用的程度。2000 年,周佳媚等^[4-5]对单线铁路隧道洞门结构分项系数进行了研究,其成果反映于现行《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)中。2001 年,谭忠盛对隧道洞门进行抗滑模型试验,提出洞门抗滑可靠度的计算方法^[6-7]。2014 年,刘昌清等^[8]基于极限状态设计法对挡土墙设计进行了研究,为隧道洞门的可靠度设计提供了一定的参考。

隧道洞门作为隧道的唯一外露部分,处于结构与边坡结合部,受力复杂,目前对于高速铁路大断面隧道洞门的可靠度研究较少,无法为规范的修订提供可参考的成果。因此,很有必要基于可靠度理论展开铁路隧道洞门目标可靠指标及分项系数的研究。

1 目标可靠指标确定方法

1.1 极限状态方程

隧道洞门受力分析采用近似分条法,土压力计算采用乌氏理论。当洞门墙取宽度为 b 的计算条带后,墙背土压力的计算简图及土压力分布如图 1 所示。

墙背土压力大小为:

$$E = 0.5\gamma_s\lambda[(h_4 + h_5)^2 + h_4(h_6 - h_4)]b\xi \quad (1)$$

式中 γ_s ——地层重度(kN/m^3);

λ ——侧土压力系数;

B ——计算条带宽度(m);

ξ ——土压力计算模式不定性系数。

其余符号意义如图 1 所示。

将洞门墙视为挡土墙,洞门结构体系的极限状态主要有抗裂极限状态、抗压极限状态、抗倾覆极限状态、抗滑动极限状态和基底极限承载力,由此可分别建立相应状态下的五个功能函数,当功能函数为 0 时转为相应状态下的基本极限状态方程。

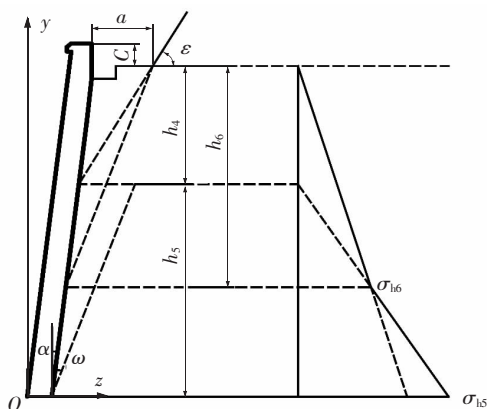


图 1 墙背土压力分布

抗裂极限状态方程为:

$$Z_1 = \sigma_1 - \frac{2P}{bt} + \frac{6(Pd_p - Ed_E)}{bt^2} \quad (2)$$

式中 σ_1 ——混凝土抗裂强度极限值(MPa);

T ——端墙厚度(m);

P ——计算条带合重(MN);

d_p, d_E ——条带合重力和土压力合力至作用线的力臂;

B ——计算条带宽度(m)。

抗压极限状态方程为:

$$Z_2 = \sigma_{ya} - \frac{4P}{bt} + \frac{6(Pd_p - Ed_E)}{bt^2} \quad (3)$$

式中 σ_{ya} ——混凝土抗压强度极限值(MPa)。

抗倾覆极限状态方程为:

$$Z_3 = Pd_p - Ed_E \quad (4)$$

抗滑动极限状态方程为:

$$Z_4 = Pf - E \quad (5)$$

式中 f ——基底摩擦系数。

基底承载极限状态方程为:

$$Z_5 = \sigma_j - \frac{4P}{bB} + \frac{6(Pd_p - Ed_E)}{bB^2} \quad (6)$$

式中 σ_j ——基底承载力强度极限值(MPa);

B ——基底沿隧道纵向的宽度(m)。

1.2 目标可靠指标计算方法

目标可靠分析中,如果结构抗力 R 和荷载效应 S 相互独立且都服从正态分布或对数正态分布,则功能函数 $Z = R - S$ 自然服从正态分布,相应的可靠指标和失效概率将会一一对应。如果基本变量之间并不服从正态分布或对数正态分布,则需要考虑它们之间的相关性,那么结构的功能函数也多数不服从正态分布。

隧道洞门结构是一个复杂的系统,其所处的地质环境较为复杂,影响洞门可靠性的不确定因素较多,且不确定因素的变异性也很大,在建立洞门体系的极限状态方程时,极限状态方程的非线性程度比较高,一般情况下不容易得到显式的解析表达式而必须用有限元数值解的隐式表达。在结构可靠度分析中,常用的方法有中心点法、验算点法、分位值法和蒙特卡罗法等。

在铁路隧道洞门目标可靠指标计算中,随机变量一般是通过大量的数理统计得出的,随机变量分布形式为正态分布或对数正态分布。隧道洞门受洞内、洞外各种不利因素影响大,是进出隧道的必经关键部位,因此要求其相关计算应尽可能的准确。由于中心点法计算结果误差较大,因此将采用验算点法、分位值法和蒙特卡罗法分别通过实例进行可靠指标计算,并对计算结果进行对比分析。

实例计算中,以时速 140 km 单线和双线铁路隧道端墙式洞门为研究对象,假设其各随机变量的标准差及均值均为已知和不考虑土压力计算模式不定性系数的影响。通过该洞门各随机变量目标可靠指标计算结果进行对比分析,由此确定出目标可靠指标最终计算方法。

1.3 目标可靠指标确定

时速为 140 km 单线和双线铁路隧道端墙式洞门计算模型如图 2 所示,洞门尺寸参数及相关的随机变量参数取值分别如表 1 和表 2 所示。

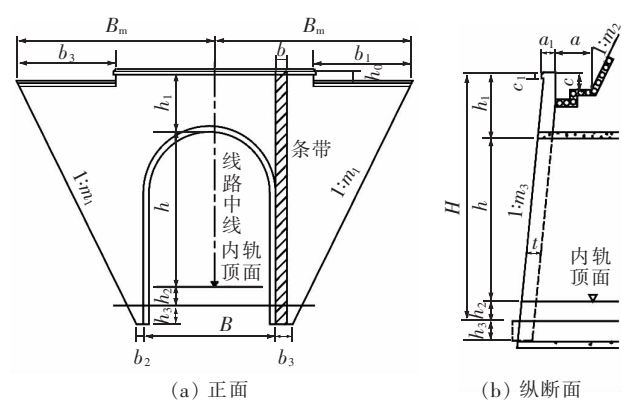


图 2 洞门计算参数量取示意图

表 1 洞门尺寸参数 (单位:m)

参数	单线	双线	参数	单线	双线
H	10.15	11.4	b	0.5	0.5
t	0.6	0.8	m_1	0.5	0.5
h_3	0.8	0.6	m_2	0.5	0.5
a_1	0.6	0.6	m_3	0.1	0.1
c_1	0.25	0.35	a	1.434	1.5
B	0.82	1.14	c	0.765	0.85

表 2 洞门随机变量参数

参数	均值	标准差	分布类型
混凝土重度/(kN/m ³)	23	0.46	正态
围岩重度/(kN/m ³)	25	1.25	正态
土压力系数	0.026	0.013	对数正态
抗拉强度/MPa	2.42	0.43	正态
抗压强度/MPa	19.18	3.45	正态
基底摩擦系数	0.7	0.14	正态
基底极限承载力/MPa	1.6	0.4	正态

将洞门尺寸参数分别代入式(1)~式(6),分别采用验算点法、分位值法和蒙特卡罗法对以上五个极限状态方程在随机变量已知条件下计算其相应的可靠指标,计算结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 单线铁路端墙式洞门可靠指标

极限状态	可靠指标		
	验算点法	分位值法	蒙特卡罗法
墙身抗裂	3.26	3.12	3.23
墙身抗压	5.56	5.24	5.58
倾覆	2.64	2.52	2.42
滑动	3.31	3.25	3.40
基底承载力	3.72	3.26	3.57

表 4 双线铁路端墙式洞门可靠指标

极限状态	可靠指标		
	验算点法	分位值法	蒙特卡罗法
墙身抗裂	3.92	3.67	3.86
墙身抗压	5.61	4.89	5.24
倾覆	3.58	3.45	3.62
滑动	3.54	3.51	3.49
基底承载力	4.68	4.07	4.24

由表 3 和表 4 的五种极限状态可靠指标计算结果可知,验算点法计算结果相对最大,分位值法普遍最小,但总体上三种方法的计算结果相差不大,最大相差在 15% 以内。五种极限状态的可靠指标中,单线铁路隧道洞门各项可靠指标比双线铁路隧道洞门相应的各项可靠指标低。单线铁路隧道洞门倾覆可靠指标最低,因此可确定倾覆失效模式为控制模式。双线铁路隧道洞门倾覆和滑动可靠指标均比较小,依据不同的计算方法来确定其失效模式。

结合计算过程可知,验算点法计算结果的精确性和收敛速度依赖于初始迭代点,若初始迭代点的值选取不当,会出现计算不收敛的情况。另外,对随机变量进行标准化变换过程给计算带来了难以预测的误差。蒙特卡罗法抽样次数足够大才能保证计算精度,耗费大量时间,计算次数多,效率低。另外,由于随机变量的均值与标准差均已知,不需要求解等效均值和标

准差。

综合考虑以上几种方法的适用范围及计算分析结果,认为分位值法相对比较简便实用,计算结果相对保守,由此确定采用分位值法进行隧道洞门可靠指标的计算。

由于目前有较为完善的铁路隧道洞门标准图,同理采用以上可靠指标计算方法可对其他形式洞门的可靠指标进行计算。考虑标准规范的现实继承性,隧道洞门目标可靠指标采用校准法按照低于最小可靠指标的原则来确定隧道洞门各极限状态下的目标可靠指标。通过对时速 140 km 单线和双线、时速 200 km 单线和时速 250 km 双线电化铁路隧道洞门标准图在五种极限状态下的可靠指标进行检算,计算出的最低可靠指标及最终确定的目标可靠指标如表 5 所示。

表 5 最低可靠指标及目标可靠指标 ($\xi=0.45$)

极限状态	墙身抗裂	墙身抗压	基底承载	倾覆	滑动
最低可靠指标	4.12	4.53	3.03	2.20	2.02
目标可靠指标	3.7	3.7	3.0	2.0	2.0

2 目标可靠指标分项系数确定方法

2.1 建立极限状态表达式

在铁路隧道洞门可靠指标计算中,结构上荷载仅考虑洞门结构自重、侧土压力和水压力。目前洞门设计中,一般不考虑水压力,所以隧道洞门极限状态设计表达通式可以表示为:

$$\gamma_0 S(\gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{G2} G_{k2}) \leq i_{ki} / \gamma_{Ri} \quad (7)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数;

G_{k1} 、 γ_{G1} ——结构自重标准值和分项系数;

G_{k2} 、 γ_{G2} ——侧土压力标准值和分项系数;

i_{ki} 、 γ_{Ri} ——抗力标准值和分项系数。

根据式(7)的定义,结合式(2)~式(6),可分别建立对应的五种极限状态设计表达式,其中包含有土压力分项系数 γ_{G2} ,墙身材料抗拉强度分项系数 γ_{Rt} 、抗压强度分项系数 γ_{Rc} ,基底摩擦力分项系数 γ_{Rf} 和基底承载力分项系数 γ_{Rp} 。

2.2 分项系数确定方法

目标可靠指标确定后,可进行分项系数的计算。分项系数确定过程中,当基本随机变量同时是正态或对数正态分布时,可用比较简单的公式求可靠指标,分项系数也可用简单公式直接求出来。在洞门目标可靠指标计算中,各基本随机变量均呈正态或对数正态分布,可采用分位值法计算分项系数。

求出结构的目标可靠指标 β_{nom} 后,即可求出结构

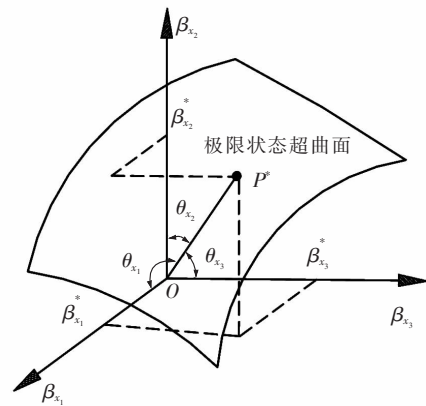


图 3 高斯空间极限状态方程的超曲面

各随机变量的变异性大小,即分配给各随机变量的分项可靠指标。如图 3 所示,由解析几何知,在高斯坐标系中,假设由原点 O 至极限状态方程超曲面的法线 OP^* 与坐标轴 β_{x_i} 夹角为 θ_i^* ,则 θ_i^* 的方向余弦为:

$$\cos \theta_i^* = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} \bigg|_{P^*} X_i^* \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \bigg|_{P^*} X_i^* \right)^2} \right]^{-1} \quad (8)$$

其中, $\frac{\partial g}{\partial X_i} \bigg|_{P^*}$ 为偏导数在“设计运算点” P^* 处的赋

值, P^* 点的坐标为 $(\beta_{x_1}, \beta_{x_2}, \dots, \beta_{x_n})$, 且有 $\frac{\partial g}{\partial X_i} \bigg|_{P^*} = \frac{\partial g}{\partial \beta_{x_i}} \frac{d\beta_{x_i}}{dX_i} \bigg|_{P^*}$, $\frac{d\beta_{x_i}}{dX_i}$ 称为随机变量 X_i 的分位导数,以符号 X_i^* 表示。这样,随机变量 X_i 的“分项可靠指标”为:

$$\tilde{\beta}_{X_i}^* = \beta_{nom} \cos \theta_i^* \quad (9)$$

求得 $\tilde{\beta}_{X_i}^*$ 后,则可通过对各基本变量进行约化高斯变量的反变换,求得其相应的设计值 \tilde{X}_{id} 为:

$$\tilde{X}_{id} = F_{x_i}^{-1} [\Phi(\tilde{\beta}_{X_i}^*)] \quad (10)$$

式(8)、式(9)和式(10)为求解结构极限状态设计式中各基本变量“分项可靠指标”和“设计值”的基本计算公式,采用迭代法对分项系数进行计算。

结构极限状态设计式中各基本变量 X_i 在各种设计计算情况下的“设计值” \tilde{X}_{id} 既经求得,则作用效应和材料抗力基本变量的分项系数分别为:

$$\begin{aligned} \gamma_{S_{X_i}} &= X_{ik} / \tilde{X}_{id} \\ \gamma_{R_{X_i}} &= \tilde{X}_{id} / X_{ik} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, X_{ik} 为基本变量 x_i 的标准值。

2.3 算例

以时速 140 km 单线铁路隧道端墙式洞门抗裂极

限状态下分项系数的计算过程为例,利用分位值法计算目标可靠指标为 3.7 条件下各分项系数的大小。

由式(1)可得端墙式洞门抗裂函数为:

$$Z_1 = \sigma_1 - \frac{2\gamma_c V}{bt} + \frac{6d_p \gamma_c V - 3d_E \gamma_s \lambda [(h_4 + h_5)^2 + h_4(h_6 - h_4)] b \xi}{bt^2} \quad (12)$$

式中, V 为条带体积(m^3),其余符号意义同前。

由式(12)可知,抗裂函数中,共有混凝土极限抗裂强度 σ_1 、混凝土重度 γ_c 、围岩重度 γ_s 、土压力系数 λ 四个随机变量,随机变量取值参照表 2。抗裂极限状态方程可变为:

$$Z_1 = g(\sigma_1, \gamma_c, \gamma_s, \lambda) = 0 \quad (13)$$

结合式(7)可知,式(13)中涉及到的分项系数为土压力作用分项系数和墙身材料抗拉强度分项系数,其对应的分位值和分位导数计算结果如表 6 所示。

表 6 随机变量的分位值和分位导数

随机变量	分位值	分位导数	分布类型
σ_1	$2.42 + 0.43\beta_{\sigma_1}$	0.43	正态
γ_c	$23 + 0.46\beta_{\gamma_c}$	0.46	正态
γ_s	$25 + 1.25\beta_{\gamma_s}$	1.25	正态
λ	$0.029\exp(0.473\beta_\lambda)$	$0.011\exp(0.223\beta_\lambda)$	对数正态

假设函数 $g(\sigma_1, \gamma_c, \gamma_s, \lambda)$ 在设计点运算 P^* 点处的值为 $g(\sigma_1, \gamma_c, \gamma_s, \lambda)$, 则函数在设计运算点 P^* 处的偏导数分别为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial g}{\partial \sigma_1} \right|_{P^*} = 1 \\ \left. \frac{\partial g}{\partial \gamma_c} \right|_{P^*} = -\frac{2V}{bt} + \frac{6d_p V}{bt^2} \\ \left. \frac{\partial g}{\partial \gamma_s} \right|_{P^*} = -\frac{3d_E \lambda^* [(h_4 + h_5)^2 + h_4(h_6 - h_4)] b \xi}{bt^2} \\ \left. \frac{\partial g}{\partial \lambda} \right|_{P^*} = -\frac{3d_E \gamma_s^* [(h_4 + h_5)^2 + h_4(h_6 - h_4)] b \xi}{bt^2} \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)计算结果代入式(8),计算出各随机变量的方向余弦,再通过式(9)和式(10)求出当前可靠指标的新的分位值,将求得的新的分位值代入到式(8)~式(10)、式(14)中进行迭代,当满足 $|\beta_{x_i}^* - \beta_{x_{i-1}}^*| \leq \varepsilon$ 时停止迭代,此时得出的 $\beta_{x_i}^*$ 代入式(10)得出的值即为变量的“理论设计值”。所谓“理论设计值”,可理解为在各变量所具有的概率分布特征和该极限状态条件下,为满足目标可靠指标要求,该变量应采用的设计

值,或者说,用该设计值在该极限状态关系式中计算出的可靠指标与目标可靠指标应该相等。有了随机变量设计值,又已知其标准值或者代表值,则按式(11)即可求出相对应的分项系数 γ_{Ri} 。

通过以上计算方法对其他四个极限状态下的分项系数进行计算,隧道洞门各极限状态下的分项系数计算结果如表 7 所示。

表 7 隧道洞门各极限状态下分项系数

极限状态	抗裂	抗压	基底承载	倾覆	滑动
γ_{G2}	4.81	4.04	2.42	2.28	2.06
γ_{Rt}	1.23				
γ_{Re}		1.14			
γ_{Rf}					1.24
γ_{Rp}			2.13		

由表 7 可知,不同极限状态下的土压力分项系数计算结果不同,其中墙身抗裂和墙身抗压受土压力分项系数影响最大;同一极限状态下,除抗倾覆只受土压力分项系数影响外,其余的四种极限状态中均受两种作用分项系数的影响,其中均受到土压力分项系数的影响并且该影响最大。

3 结论

(1)通过对三种适用于铁路隧道洞门目标可靠指标计算方法进行分析比较和结合实例计算,认为分位值法相对简便实用,计算结果相对保守。确定了采用分位值法进行目标可靠指标的计算方法。

(2)详细介绍了分位值法计算铁路隧道洞门目标可靠指标分项系数的计算过程,并通过实例计算验证了分位值法计算分项系数的可行性。

(3)在铁路隧道洞门各极限状态中,土压力分项系数的影响最大,下一步应对土压力的统计特征展开重点研究。

参考文献:

- [1] GB 50216—1994, 铁路工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [2] GB 50216—1994, Unified Design Standard for Reliability of Railway Engineering Structures [S].
- [2] 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): 13-18.
- Jing Shiting. The Advance of Reliability Research of Underground Structure [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1995(2): 13-18.

(下转第 108 页 To P. 108)