

隧道格栅钢架喷混凝土支护安全性评价

李洪泉¹, 杨成永¹, 徐明新¹, 陆景慧²

(1. 北京交通大学 隧道及地下工程研究中心, 北京 100044; 2. 北京市煤气热力工程设计院有限公司, 北京 100032)

摘要: 在过去研究成果基础上, 建立施工期隧道格栅钢架喷混凝土支护的安全性评价方法。首先根据我国相关规范中的有关公式, 提出支护结构截面失效的功能函数。接着, 采用抛物线来插值支护中线, 在线弹性、小变形和平截面等假设条件下, 推导了根据测量位移求支护内力的计算公式。然后, 讨论钢筋材料特性(钢筋抗压强度、抗拉强度和弹性模量)、钢筋截面面积及喷混凝土保护层厚度等基本随机变量的不确定性。最后, 对兰新铁路增建二线乌鞘岭隧道及北京地铁四号线黄庄车站 2 个隧道进行工程实例分析。实例分析表明, 所提方法的评价结果能够正确反映隧道的实际安全状态, 得到的可靠指标也与我国规范所要求的范围相一致。本研究是对施工期隧道安全性位移方法的进一步完善, 所提方法可用于隧道格栅钢架喷混凝土支护的安全性评价, 具有较好的理论和实用价值。

关键词: 隧道工程; 施工期隧道; 格栅钢架喷混凝土; 结构可靠度; 位移方法

中图分类号: U 455

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 3903 - 06

ASSESSMENT ON SAFETY OF LATTICE GIRDER REINFORCED SHOTCRETE SUPPORT FOR TUNNELS

LI Hongquan¹, YANG Chengyong¹, XU Mingxin¹, LU Jinghui²

(1. *Research Center of Tunnel and Underground Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;*
2. *Beijing Gas and Heating Engineering Design Institute Co., Ltd., Beijing 100032, China*)

Abstract: Based on the previous research, lattice girder reinforced shotcrete support is dealt with, and a method is set up to evaluate the safety of this kind of support for a tunnel in construction. Firstly, performance functions to a cross-section of the support are put forward according to the correlative formulae from Chinese codes. Then, parabola is employed to interpolate the central axis of an arch-like support segment, and the formulas to calculate internal forces of the support are derived through measured displacements under assumptions of linearly elastic material, small deformation, and plane cross-section etc.. After that, the uncertainty of the basic random variables, such as mechanical properties of rebars(compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity), the sectional area of rebars and thickness of shotcrete cover, is discussed. At last, case studies are conducted in two tunnels, Wushaoling Tunnel at the second line of Lanzhou—Xinjiang Railway and Huangzhuang Station at Line 4 in Beijing subway. Case studies show that the obtained results are consistent with in-situ situations and calculated reliability indices fall into the interval required by national codes. This work improves the so-called displacement-based method and addresses the very real need of assessing the safety of lattice girder shotcrete support during tunnel construction. This study is of both theoretical and practical significances.

Key words: tunnelling engineering; tunnel in construction; lattice girder reinforced shotcrete; structural reliability; displacement-based method

收稿日期: 2008 - 07 - 31; **修回日期:** 2009 - 01 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978020)

作者简介: 李洪泉(1966 -), 男, 博士, 1987年毕业于福州大学土木工程系工业与民用建筑专业, 现任高级工程师, 主要从事地下空间利用方面的研究工作。E-mail: lhq@qydl.sina.net

1 引言

隧道支护结构可靠性的研究方法可分为两大类：荷载法和位移法。荷载法即按照“荷载-结构模型”或“连续介质模型”，经荷载计算支护内力，然后进行支护结构的可靠性分析。荷载法需要处理围岩的复杂性，围岩与支护间共同作用的不确知性，以及随机变量的大变异性等问题。位移法则是利用隧道支护的实测位移，计算支护内力，从而进行支护结构的可靠性分析^[1]。位移法弥补了荷载法的一些缺点，而其困难主要体现在通过位移计算内力的不唯一性：如何从测得的变形中扣除干缩和徐变变形；若构件进入塑性状态后，如何计算塑性变形等。

位移法自提出后，已取得了一些后续的研究进展，包括采用负指数函数拟合喷混凝土强度随时间的增长^[2]，增加了喷混凝土特性的统计资料，改进了可靠指标的计算步骤^[3]；进行了位移方法与隧道极限位移的对比，计算了隧道极限位移所对应的可靠指标^[4]；研究了圆曲线、抛物线、正弦曲线和双曲线对位移分析方法的适应性，得出抛物线较好，而双曲线不宜采用的结论^[5]；讨论了喷混凝土干缩和徐变^[6]，探讨了根据量测位移计算支护内力的方法^[7]；还就温度影响下，喷混凝土支护安全性的评价方法进行了尝试^[8]。

但上述工作只是针对素喷混凝土，而钢拱架喷混凝土应用也很广泛，需要进行进一步研究。本文将在既有研究工作基础上，建立以位移为基础的施工期隧道格栅钢架喷混凝土支护安全性的评价方法。文章首先提出了格栅钢架喷混凝土支护结构截面失效的功能函数，然后推导了根据测量位移求支护内力的计算公式，接着讨论了钢筋材料特性、钢筋截面面积及喷混凝土保护层厚度等基本随机变量的统计特征，最后进行了工程实例分析。

2 结构功能函数

隧道格栅钢架喷混凝土支护，属于偏心受压构件。在满足大多数工程需要前提下，为简化起见，本文假定：

- (1) 在喷层两侧都只配有一层钢筋。
- (2) 喷层两侧配筋面积相同(对称配筋)。
- (3) 钢筋的抗拉和抗压强度相等。

(4) 取一个格栅钢架及其两侧 0.5 倍格栅间距范围内的喷混凝土进行分析，并认为这一环状结构处于平面应变状态。

(5) 忽略纵向连接筋在相邻格栅间引起的内力分配。由于是根据测量位移计算支护内力，忽略纵向连接筋的作用对所讨论支护环内力计算结果的影响，主要在支护应力的分布上，对总内力影响不大。

根据以上假定参照图 1，可得到如下的格栅钢架喷混凝土截面失效的功能函数^[9, 10]：

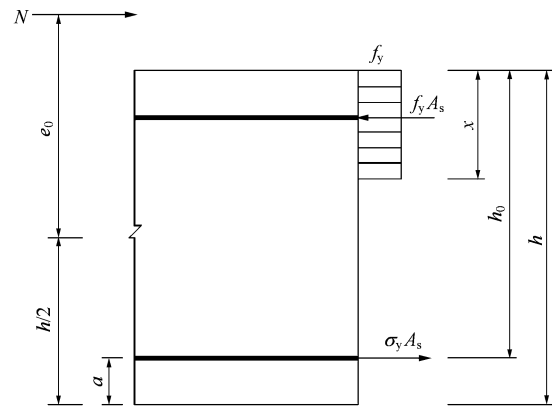


图 1 矩形截面偏心受压构件受力图

Fig.1 Forces diagram of an eccentric compression component with rectangular cross-section

大偏心受压($x \leq x_b$)时：

$$g = \min \left\{ f_{cm}bx - N, f_{cm}bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s (h_0 - a) - Ne \right\} \quad (1)$$

$$x = \begin{cases} h_0 - e + \sqrt{(h_0 - e)^2 + 2 \frac{f_y A_s}{f_{cm} b} (h_0 - a)} & \left(e_0 < \frac{1}{2} (h_0 - a) \right) \\ h_0 - e + \sqrt{(h_0 - e)^2 + 2 \frac{f_y A_s}{f_{cm} b} (2e + a - h_0)} & \left(e_0 \geq \frac{1}{2} (h_0 - a) \right) \end{cases} \quad (2)$$

$$x_b = \xi_b h_0 \quad (3)$$

$$\xi_b = \frac{0.8}{1 + \frac{f_y}{0.003 3E_s}} \quad (4)$$

$$e = e_i + \frac{1}{2}(h_0 - a) \quad (5)$$

$$e_i = e_0 + e_s \quad (6)$$

$$e_s = \begin{cases} 0.12(0.3h_0 - e_0) & (e_0 < 0.3h_0) \\ 0 & (e_0 \geq 0.3h_0) \end{cases} \quad (7)$$

$$e_0 = \frac{M}{N} \quad (8)$$

$$h_0 = h - a \quad (9)$$

式中: x 为混凝土受压区高度(m), x_b 为混凝土界限受压区高度(m), ξ_b 为相对界限受压区高度, e 为轴力作用点至受拉钢筋合力点的距离(m), e_i 为初始偏心距(m), e_s 为附加偏心距(m), e_0 为轴力对截面重心的偏心距(m), h_0 为截面有效高度(m), N 为轴力(kN), M 为弯矩(kN·m), f_{cm} 为混凝土弯曲抗压强度(kPa), f_y 为钢筋抗拉及抗压强度(kPa), E_s 为钢筋的弹性模量(kPa), A_s 为受拉及受压钢筋截面面积(m²), b 为截面宽度(m), h 为截面高度(m), a 为受拉及受压钢筋合力点至截面近边的距离(m).

小偏心受压($x > x_b$)时:

$$g = \min \left\{ f_{cm}bx + (f_y - \sigma_s)A_s - N, f_{cm}bh \left(\frac{h}{2} - a \right) + f_yA_s(h_0 - a) - N \left(\frac{h}{2} - a - e_0 + e_s \right) \right\} \quad (10)$$

式中: σ_s 为受拉钢筋的应力(kPa), 其表达式为

$$\sigma_s = \frac{f_y}{\xi_b - 0.8} \left(\frac{x}{h_0} - 0.8 \right)$$

当 $x > h$ 时, 式(1), (10)中取 $x = h$, 而受拉钢筋的应力 σ_s 仍按求出的 x 进行计算。

轴力 N 与弯矩 M 在下面的假设条件下, 可根据支护位移来计算:

- (1) 喷层挠度小, 在该小变形量级下, 喷混凝土及钢筋是线弹性材料;
- (2) 喷层截面在变形过程中保持为平面, 即假定平截面假设成立;
- (3) 受压区混凝土的压应力呈三角形分布或矩形分布;
- (4) 受拉区混凝土的抗拉贡献忽略不计。

在上述假设条件下, 轴力和弯矩的改变可用下式计算:

$$\Delta N_i = (E_i bh + 2E_s A_s) \Delta \varepsilon_i \quad (11)$$

$$\Delta M_i = \left[\frac{b}{2} E_i z^2 \left(h_0 - \frac{z}{3} \right) + E_s A_s (z - a)(h_0 - a) \right] \left[\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_{i-1}} \right] \quad (12)$$

$$z = \frac{E_s A_s}{b E_i} \left(-2 + \sqrt{4 + \frac{2bh E_i}{E_s A_s}} \right) \quad (13)$$

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{L_i - L_{i-1}}{L_{i-1}} \quad (14)$$

式中: z 为仅考虑纯弯变形时的混凝土受压区高度(m); $\Delta \varepsilon_i$ 为从第 $i-1$ 到 i 次测量时喷层中线的应变增量; ΔN_i 为从第 $i-1$ 到 i 次测量时的轴力增量(kN); ΔM_i 为从第 $i-1$ 到 i 次测量时的弯矩增量(kN·m); E_i 为第 i 次测量时喷混凝土的切线弹性模量(kPa); L_i, L_{i-1} 分别为第 i 及第 $i-1$ 次测量时喷层弧段中线的长度(m); ρ_i, ρ_{i-1} 分别为第 i 及第 $i-1$ 次测量时喷层弧段中线的曲率半径(m)。

式(12)是当受压区混凝土的压应力呈三角形分布时的计算公式, 当受压区混凝土的压应力呈矩形分布时, 只需把式(12)中等号右边的 $h_0 - z/3$ 一项变成 $h_0 - z/2$ 即可。本文采用的是三角形分布。

为了计算式(11)和(12)中的弧长和曲率半径, 需要用一条曲线来插值支护中线。本文选用抛物线来插值一个支护弧段中线的 3 个点: 顶点和 2 个端点。为方便起见, 建立如图 2 所示的 x - y 坐标系。横轴为 x 轴, 穿过 A 和 B 点, 指向右。纵轴为 y 轴, 穿过 C 点, 指向上。

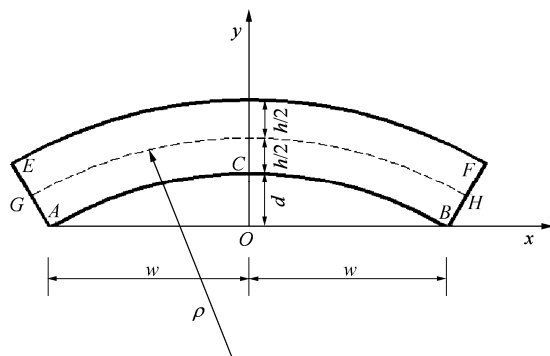


图 2 支护弧段与坐标系

Fig.2 A lining segment and coordinate axes

参考图 2 所示的坐标系, 抛物线插值拱腹 ACB 曲线的方程可推导如下:

$$y = -\frac{d}{w^2}x^2 + d \quad (-w \leq x \leq w) \quad (15)$$

式中： d 、 w 分别为拱 ACB 的拱高(m)和拱半宽(m)。

然后，可推出计算支护中线弧长和曲率半径的公式为

$$\rho = \rho_{in} + \frac{h}{2} \quad (16)$$

$$L = b\sqrt{1+4a^2b^2} + \frac{1}{2a}\ln(2ab + \sqrt{1+4a^2b^2}) \quad (17)$$

式中： y' 为 y 对 x 的一阶导数，且有 $y' = -2dx/w^2$ ； y'' 为 y 对 x 的二阶导数，且有 $y'' = -2d/w^2$ ； L 为喷层中线的弧长(m)； h 为喷层厚度(m)； $a = [d + 0.5h(1 - \cos \gamma)]/b^2$ ， $b = w + 0.5h \sin \gamma$ ， γ 为拱腹线 ACB 在端点 A 、 B 处切线的倾角(rad)，且有 $\gamma = \arctan(2d/w)$ ； ρ 为喷层中线的曲率半径(m)； ρ_{in} 为拱腹线的曲率半径(m)， $\rho_{in} = [1 + (y')^2]^{3/2} / |y''|$ ， $|\cdot|$ 表示对 y'' 取绝对值，以保证 ρ_{in} 取正值。 ρ_{in} 取负值此处无意义，并且，不考虑一个支护弧段，变形后改变其凸性，即喷层的曲率半径不改变其符号。

3 钢筋及其保护层厚度的不确定性

从式(1)~(17)可以看出，功能函数中的随机变量包括支护位移(支护弧段拱腹线的矢高和矢宽)、喷层厚度及喷混凝土材料性能(喷混凝土抗压强度和弹性模量)、钢筋材料性能(钢筋抗压强度、抗拉强度和弹性模量)、钢筋截面面积和钢筋保护层厚度。下面只讨论钢筋及其保护层厚度的不确定性，其他变量的不确定性见相关研究^[1, 3]。

沈在康等^[11~13]对钢筋材料力学性能及保护层厚度的概率特征进行了较为详细的研究，钢筋强度随等级不同而不同，具体统计结果见表 1。

表 1 钢筋力学性能及保护层厚度的统计结果

Table 1 Statistic results of rebars mechanical properties and shotcrete cover

| HPB235 钢筋强度 | | | HRB335 钢筋强度 | | | HRB400 钢筋强度 | | |
|-------------|---------|------|-------------|---------|------|-------------|---------|------|
| 均值 /MPa | 变异系数 | 分布概型 | 均值 /MPa | 变异系数 | 分布概型 | 均值 /MPa | 变异系数 | 分布概型 |
| 243.8 | 0.089 5 | 正态 | 384.8 | 0.074 3 | 正态 | 408.5 | 0.071 3 | 正态 |
| 钢筋截面面积 | | | 钢筋中心保护层厚 | | | | | |
| 均值 | 变异系数 | 分布概型 | 均值 | 变异系数 | 分布概型 | | | |
| A_d | 0.03 | 正态 | $0.85a_d$ | 0.30 | 正态 | | | |

注： A_d 为设计面积， a_d 为设计保护层厚。

刘 幸等^[14]根据所收集的资料及《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(GB50199 - 94)编写组的统计数据，得到的统计结果见表 2。

表 2 钢筋随机变量的统计结果^[14]

Table 2 Statistic results of random variables of rebars^[14]

| HRB335 钢筋强度 | | | 钢筋截面面积 | | | 钢筋弹性模量 | | |
|-------------|------|------|--------|------|------|-------------------|------|------|
| 均值 /MPa | 变异系数 | 分布概型 | 均值 | 变异系数 | 分布概型 | 均值 /MPa | 变异系数 | 分布概型 |
| 380 | 0.08 | 正态 | A_d | 0.01 | 正态 | 2.0×10^5 | 0.30 | 正态 |

根据表 1, 2 以及我国规范^[10, 15]关于钢筋材料的规定，本文提出钢筋及其保护层厚度的概率特征如表 3 所示。

4 实例分析

(1) 兰新二线乌鞘岭隧道

乌鞘岭隧道右线迂回导坑 $YyK0+188$ 断面为圆形。围岩等级为 VI 级，为软弱破碎围岩。初支测点处拱宽为 10.144 6 m，拱高为 3.586 7 m。喷混凝土强度等级 C20，设计厚度 25 cm。双面对称配筋 $4\phi 28$ mm，保护层厚度为 40 mm。选择下半断面施作后支护位移的测量数据进行计算。

表 3 钢筋及保护层厚度的概率特征

Table 3 Probabilistic characteristics of rebars and shotcrete cover

| HPB235 钢筋强度 | | | HRB335 钢筋强度 | | | HRB400 钢筋强度 | | | 钢筋截面面积 | | |
|------------------|------|------|------------------|------|------|------------------|------|------|--------|------|------|
| 均值/MPa | 变异系数 | 分布概型 | 均值/MPa | 变异系数 | 分布概型 | 均值/MPa | 变异系数 | 分布概型 | 均值 | 变异系数 | 分布概型 |
| 240 | 0.08 | 正态 | 340 | 0.08 | 正态 | 400 | 0.08 | 正态 | A_d | 0.03 | 正态 |
| HPB235 钢筋模量 | | | HRB335 钢筋模量 | | | HRB400 钢筋模量 | | | 钢筋保护层厚 | | |
| 均值/(10^5 MPa) | 变异系数 | 分布概型 | 均值/(10^5 MPa) | 变异系数 | 分布概型 | 均值/(10^5 MPa) | 变异系数 | 分布概型 | 均值 | 变异系数 | 分布概型 |
| 2.1 | 0.08 | 正态 | 2.0 | 0.08 | 正态 | 2.0 | 0.08 | 正态 | a_d | 0.30 | 正态 |

计算所用的参数,按经验值和设计值两种方法确定。按经验取值的参数有:拱宽测量误差均值为 0.0 mm,标准差 0.74 mm;拱高测量误差均值为 0.0 mm,标准差 0.74 mm;喷混凝土的时间常数 $\alpha=0.015 \text{ h}^{-1}$ 。按设计取值的参数有:支护厚度均值 25 cm,变异系数 0.09;喷混凝土抗压强度均值 20 MPa,变异系数 0.18;喷混凝土抗拉强度均值 1.8 MPa,变异系数 0.18;喷混凝土弹性模量均值 21 GPa,变异系数 0.18;钢筋面积均值 2 463.01 mm^2 ,变异系数 0.03;钢筋强度均值 340 MPa,变异系数 0.08;钢筋模量均值 200 GPa,变异系数 0.08;钢筋保护层厚度均值 40 mm,变异系数 0.30。

不同时刻支护的矢宽、矢高值及计算得到的可靠指标列于表 4。

表 4 乌鞘岭隧道以位移为基础的可靠度分析
Table 4 Displacement-based reliability analysis of Wushaoling Tunnel

| 测量时间 /年月日 | 混凝土 龄期/d | 拱宽量测 值/mm | 拱高量测 值/mm | 失效 概率 | 可靠 指标 |
|--------------|-------------|--------------|--------------|-----------------------|----------|
| 20040912 | 4 | 10 054.5 | 3 549.9 | - | - |
| 20040913 | 5 | 10 052.8 | 3 549.5 | 1.00×10^{-5} | 4.265 |
| 20040915 | 7 | 10 049.9 | 3 548.1 | 0.001 10 | 3.056 |
| 20040916 | 8 | 10 046.9 | 3 547.5 | 0.023 70 | 1.982 |
| 20040917 | 9 | 10 044.5 | 3 546.1 | 0.263 80 | 0.632 |
| 20040919 | 11 | 10 041.7 | 3 544.3 | 0.831 30 | -0.959 |
| 20040924 | 16 | 10 038.6 | 3 541.6 | 0.998 50 | -2.960 |
| 20040926 | 18 | 10 037.6 | 3 539.9 | 0.999 96 | -3.944 |

本隧道位于高地应力地区的断层破碎带内,初支施做后,变形一直增加,导致隧道缩径,初支破坏。后来改变设计,增加初支厚度,并在初支后随即施作二衬。结算结果正确反映了该隧道初支断面逐渐变形并产生破坏的过程。

(2) 北京地铁四号线黄庄车站

北京地铁四号线黄庄车站 0+3.0 断面初支为钢拱架喷混凝土结构,喷混凝土强度等级 C20,隧道围岩等级为 VI 级。断面净高 4.824 m,净宽 7.8 m,设计厚度 35 cm。双面对称配筋 $4\phi 25 \text{ mm}$,中心保护层厚度为 40 mm。

计算参数按经验值和设计值两种方法确定。按经验取值的参数有:拱宽测量误差均值为 0.0 mm,标准差 0.74;拱高测量误差均值为 0.0 mm,标准差 0.74;喷混凝土的时间常数 $\alpha=0.015 \text{ h}^{-1}$ 。按设计取值的参数有:支护厚度均值 35 cm,变异系数 0.09;

喷混凝土抗压强度均值 20 MPa,变异系数 0.18;喷混凝土抗拉强度均值 1.8 MPa,变异系数 0.18;喷混凝土弹性模量均值 21 GPa,变异系数 0.18;钢筋面积均值 1 963.50 mm^2 ,变异系数 0.03;钢筋强度均值 340 MPa,变异系数 0.08;钢筋模量均值 200 GPa,变异系数 0.08;钢筋保护层厚度均值 40 mm,变异系数 0.30。

按照各项参数及拱部收敛和拱顶下沉监控量测数据,可得位移法的计算结果如表 5 所示。

表 5 黄庄车站以位移为基础的可靠度分析
Table 5 Displacement-based reliability analysis of Huangzhuang Station

| 测量时间 /年月日 | 混凝土 龄期/d | 拱宽量测 值/mm | 拱高量测 值/mm | 失效概率 | 可靠指标 |
|--------------|-------------|--------------|--------------|----------|-------|
| 20051201 | 3 | 7 156.58 | 2 178.74 | - | - |
| 20051209 | 11 | 7 156.69 | 2 178.70 | 0.000 01 | 4.265 |
| 20051216 | 18 | 7 156.21 | 2 178.25 | 0.000 50 | 3.314 |
| 20051223 | 25 | 7 156.73 | 2 178.72 | 0.000 10 | 3.719 |
| 20051230 | 32 | 7 156.21 | 2 178.72 | 0.000 50 | 3.269 |
| 20060104 | 37 | 7 156.11 | 2 178.70 | 0.000 80 | 3.149 |
| 20060111 | 44 | 7 155.75 | 2 178.72 | 0.001 80 | 2.915 |
| 20060115 | 51 | 7 155.75 | 2 178.72 | 0.002 00 | 2.884 |
| 20060122 | 58 | 7 155.75 | 2 178.72 | 0.002 20 | 2.842 |

本隧道断面在施工过程中一直处于正常状态,结算结果反映了隧道的实际稳定状况。

从表 4 和 5 可以看出,喷混凝土支护截面的可靠指标较大时,未发生破坏;可靠指标较小时(乌鞘岭隧道第 9 天开始),支护出现开裂。计算结果与实际情况相符。此外,从可靠指标的具体数值来看,还与我国现行规范^[9]和标准^[10]对可靠指标的规定相一致。实例验算表明,本文所建立的位移方法的计算结果在合理的范围内。

5 结 论

本文针对格栅钢架喷混凝土,在线弹性、小变形和平截面等假设条件下,推导了根据支护测量位移计算其内力的公式。并参考国家相关规范提出了极限状态方程。讨论了钢筋材料性能、钢筋面积和钢筋保护层厚度的变异性,确定了各个随机变量的统计参数。对 2 个隧道工程进行了计算,计算结果正确反映了隧道的实际安全状态,计算得到的可靠指标在我国规范所要求的范围内。

本文工作进一步完善了以位移为基础的施工期隧道喷混凝土支护安全性的评价方法。

然而,本次研究只是阶段性的。下一步有待研究的内容包括但不限于:

(1) 本文只讨论了格栅钢架,对于型钢钢架喷混凝土支护,还需要进行进一步研究。

(2) 本文假设支护仅发生小变形,事实上在喷混凝土强度增长期有可能发生大变形,因此需要研究支护的大变形行为。

(3) 李洪泉等^[7]只讨论了干缩和徐变对素喷混凝土支护安全性的影响,对于钢架喷混凝土支护结构,干缩和徐变的影响还需要考虑。

(4) 徐明新等^[8]只考虑了隧道内空气温度的改变,没有考虑喷混凝土的水化热,因此需要对由于喷混凝土水化热引起的隧道温度改变进行进一步研究。

(5) 喷混凝土性质参数随时间变化的既有研究成果还较缺乏,需要进行更多的试验以获取统计数据。

(6) 针对位移方法计算得到的可靠指标还需进行分级。

(7) 把位移方法扩展到隧道二衬及其他地下结构的安全性分析中。

参考文献(References):

- [1] 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]. 岩石力学工程学报, 2003, 22(2): 266 - 269.(YANG Chengyong, ZHANG Mi, BAI Xiaoliang. 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))
- [2] ORESTE P P. A procedure for determining the reaction curve of shotcrete lining considering transient conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(3): 209 - 236.
- [3] YANG C Y, XU M X, CHEN W F. Reliability analysis of shotcrete lining during tunnel construction[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2007, 133(12): 975 - 981.
- [4] 谢圣娟. 施工期隧道喷锚衬砌结构可靠度研究[硕士学位论文][D]. 北京: 北京交通大学, 2004.(XIE Shengxian. Study on reliability of shotcrete-bolt support structure for tunnels under construction[M. S. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2004.(in Chinese))
- [5] XU M X, YANG C Y, CHEN W F. Adaptability of interpolated curves to the displacement-based method for reliability analysis of tunnel lining of shotcrete[C]// Innovation and Sustainability of Modern Railway. Beijing: China Railway Publishing House, 2008: 278 - 286.
- [6] HELLMICH C, SERCOMBE J, ULM F J, et al. Modeling of early-age creep of shotcrete. II: application to tunneling[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(3): 292 - 299.
- [7] 李洪泉, 杨成永, 陆景慧. 干缩和徐变对隧道喷射混凝土支护安全性的影响[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(4): 18 - 22.(LI Hongquan, YANG Chengyong, LU Jinghui. Influence of shrinkage and creep of shotcrete on the safety of the primary support of tunnels[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(4): 18 - 22.(in Chinese))
- [8] 徐明新, 杨成永, 李洪泉. 温度对隧道喷混凝土支护安全性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009(待刊).(XU Mingxin, YANG Chengyong, LI Hongquan. Influence of temperature on the safety of primary lining of tunnels[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009(to be published).(in Chinese))
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. TB 10003 - 2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB 10003 - 2005 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50010 - 2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50010 - 2002 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [11] 沈在康. 混凝土结构设计新规范应用讲评[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.(SHEN Zaikang. Remark on the application of the new code for design of concrete structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993.(in Chinese))
- [12] 马宏旺, 赵国藩. 钢筋混凝土矩形柱截面曲率延性系数概率分析[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(4): 485 - 490.(MA Hongwang, ZHAO Guofan. Probability analysis for curvature ductility factor of square-confined reinforced concrete columns[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(4): 485 - 490.(in Chinese))
- [13] 刘天云, 吕克顺, 赵国藩. 钢筋混凝土框架结构的可靠性分析[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(2): 223 - 227.(LIU Tianyun, LU Keshun, ZHAO Guofan. Reliability analysis of reinforced concrete frames[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38(2): 223 - 227.(in Chinese))
- [14] 刘 幸, 方 梅, 陈 震, 等. 三峡电站钢衬钢筋混凝土压力管道可靠性分析[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(3): 23 - 27.(LIU Xing, FANG Mei, CHEN Zhen, et al. Reliability analysis of steel lined compressive pipe of reinforced concrete at Three Gorges Power Station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(3): 23 - 27.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10108 - 2002 铁路隧道喷锚衬砌法技术规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB 10108 - 2002 Code for shotcrete-bolt construction method of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50216 - 94 铁路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50216 - 94 Unified design standard for reliability of railway engineering structures[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))