

文章编号: 1000-7598-(2008) 增-232-05

基于响应面法的软岩隧道湿喷纤维 混凝土支护结构可靠度分析

华 渊¹, 周太全¹, 吕宝华²

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 中铁 19 局集团第 5 工程有限公司, 大连 116000)

摘 要: 由于湿喷纤维混凝土支护结构物理、力学参数和喷层厚度的离散性及混凝土强度破坏准则难以用支护材料参数显式表达, 对该类隧道支护结构进行可靠度分析十分困难, 提出采用响应面方法计算湿喷纤维混凝土支护结构的可靠度方法, 并给出了计算流程, 其中围岩-支护结构的确定性分析采用非线性有限元方法, 可靠度分析采用 2 次响应面法。以赣州—龙岩铁路金华山软岩隧道湿喷纤维混凝土支护结构为研究对象, 对该支护结构的可靠度进行分析与计算。分析结果表明, 金华山隧道湿喷纤维混凝土支护结构可靠度指标高, 处于安全状态。

关 键 词: 隧道支护结构; 纤维混凝土; 可靠度分析; 响应面法; 非线性有限元

中图分类号: U 459

文献标识码: A

Reliability analysis of wet-sprayed fiber reinforced concrete lining structure within soft and weak rock mass using response surface method

HUA Yuan¹, ZHOU Tai-quan¹, LÜ Bao-hua²

(1. College of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. No.5 Engineering Department, China Railway Construction Group No.19 Company, Dalian 116000, China)

Abstract: Due to the diversity of the wet-sprayed fiber reinforced concrete lining structure physico-mechanical parameters and the difficulty of the explicit expression of limit state failure function for concrete strength, the reliability analysis for the wet-sprayed concrete lining structure is difficult to perform. The response surface method is proposed to calculate the reliability of the wet-sprayed concrete lining structure. The calculation process is given. In the determination calculation of the rockmass and tunnel lining structure, the nonlinear finite element method is used while the second order response method is used in the reliability analysis. As a case study, the wet-sprayed fiber reinforced concrete tunnel lining structure for Ganzhou-Longyan Jinhua Shan Railway tunnel in soft and weak rockmass, the reliability analysis for the tunnel lining structure is performed using the method proposed. The numerical analysis result shows that the reliability index for the wet-sprayed concrete tunnel lining structure is higher and the tunnel lining structure is in safe state.

Key words: fiber reinforced concrete; tunnel lining structure; reliability analysis; response surface method; nonlinear finite elements analysis

1 引 言

喷射混凝土作为隧道支护结构, 具有连续、快速的特点, 与纤维混凝土抗拉和抗弯强度较高及变形能力较佳的优势结合, 降低了隧道的衬砌结构尺寸, 增强隧道的整体性, 改善了隧道的安全性及洞

内的作业环境, 同时避免了 2 衬混凝土背后不易密实的缺陷^[1], 而采用湿喷聚丙烯纤维混凝土代替钢筋网喷射混凝土支护, 大大提高了施工速度, 比常规的挂钢筋网喷射混凝土法节约大约 1/2 的时间。本课题组已经在宝(鸡)至兰(州)铁路复线东巨寺沟隧道内Ⅲ级进行过湿喷纤维混凝土锚喷支护结

收稿日期: 2008-07-24

作者简介: 华渊, 男, 1960 年生, 院长, 教授, 主要从事桥梁与隧道工程、岩土力学等方面教学科研工作。E-mail: huayuanxinxiang@163.com

构作为永久性衬砌试验，并在赣州—龙岩铁路金华山软弱围岩隧道中应用湿喷纤维混凝土作为初期支护结构，实际应用的效果良好。湿喷纤维混凝土中混凝土喷层材料的物理、力学参数取值离散性强，不同区域变异性较大。由于喷射工艺的影响，混凝土喷层的厚度有一定的不确定性。以上因素导致湿喷纤维混凝土初期支护结构的支护效果不确定性，因此采用可靠度分析方法对支护结构进行分析较为合理。

目前结构可靠度分析中常用的一次 2 阶矩法、JC 法、蒙特卡罗法以及随机有限元法^[2-3]等，用于这类大型非线性结构的可靠度分析难以得到满意的结果。本文提出用响应面法分析湿喷纤维混凝土支护结构的可靠度，具有以下特点：①可以直接使用已有的有限元计算程序；②用非线性的响应面函数替代实际的复杂极限状态函数，使得可靠度计算简便、高效，而且计算精度较高。

2 结构可靠度计算的响应面法

在结构可靠度计算中，根据极限状态方程 $Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 来判别结构是否处于安全状态。该方程将基本变量空间分成失效区和安全区两个部分，结构的失效概率为

$$P_f = \int_{Z < 0} \dots \int f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1)$$

式中： $f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 为 n 维基本变量 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 的概率密度函数。

对于隧道支护结构，极限状态方程 $Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 是非线性方程，而且概率密度函数 $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 也难以求得，因此精确计算隧道支护结构失效概率十分困难。将围岩看作是隧道支护结构体系一部分的“地层结构”模型可以对隧道开挖、锚喷层施工全过程进行有效的模拟。采用数值方法对围岩—隧道支护结构进行分析可以对施工过程中围岩、支护结构的应力分布、塑性区分布得到充分的认识。

结构可靠度计算的 2 次响应面法属于 SORM 算法是用一个待定的 2 次函数来逼近实际的非线性极限状态方程，使可靠度计算过程得到简化，并得到较高的计算精度。Bucher^[3]于 1990 年提出了如下形式的 2 次响应面函数，并得到了广泛的应用，即

$$g(X) = a + \sum b_i x_i + \sum c_i x_i^2 \quad (2)$$

式中：系数 a 、 b_i 、 c_i 需由 $2n+1$ 个样本点得到足够的方程来确定。

下面简单阐述这一方法求取可靠度指标的计算过程。第 1 步，以均值点为中心点，在区间 $(\mu_x - f\sigma_x, \mu_x + f\sigma_x)$ 内选取样本点，用 μ_x 在样本点处的 $2n+1$ 个函数值，确定出系数 a 、 b_i 、 c ，得到响应面函数后可以按照 J-C 法求得在设计验算点 x_D 处的可靠度指标。第 2 步是选取新的样本中心点，新的样本中心点 x_M 选在由均值点 μ_x 到 x_D 的直线上，并保证在新的中心点处满足 $g(X)=0$ ，即 $x_M = \mu_x + (x_D - \mu_x) \frac{g(\mu_x)}{g(\mu_x) - g(x_D)}$ ，再以 x_M 为中心点选取新的一组样本点，重复第一步的过程，求得在新的设计验算点处的可靠度指标。

3 工程概况

赣—龙铁路某单线隧道地质情况复杂，进口端洞口位于 DK133+095，接 25 m 明洞，单压式明洞门，出口端洞口位于 DK138+237，进口段 845 m 采用 IV~VI 级围岩曲墙有仰拱复合式衬砌，衬砌厚度分别为 30、45 cm 和 70 cm；C20 喷射混凝土厚 18 cm。出口段 140 m 采用 IV 级围岩曲墙有仰拱复合式衬砌，C20 喷混凝土厚 14 cm，曲墙有仰拱模筑 C20 混凝土衬砌厚 30 cm。洞身段 4 157 m 采用 III 级围岩复合式衬砌，C20 喷混凝土厚 10 cm，直墙无仰拱模筑 C20 混凝土衬砌厚 25 cm，铺底厚 20 cm。全隧道洞内两侧设普通高式水沟，隧道衬砌拱部背后设 PE 板（衬无纺布），边墙竖向设 $\phi 50$ mm 全塑排渗管盲沟，间距为 12 m，拱脚纵向设 $\phi 90$ mm 全塑排渗管盲沟，并与竖向盲沟连通。

金华山隧道内 IV 级软弱围岩地质情况为：千枚状页岩夹石英砂砾岩、石英砂岩，紫红色、灰绿色，风化极严重~颇重，节理、裂隙发育，地下水不发育如图 1 所示，隧道围岩地质描述见表 1。

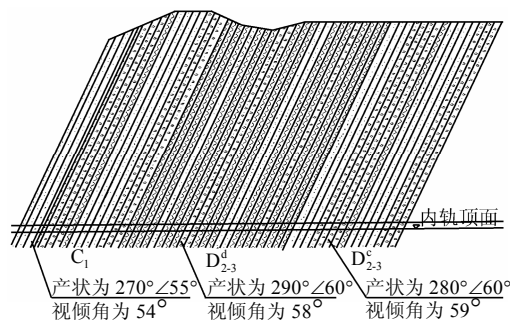


图 1 隧道围岩地质分布

Fig.1 Tunnel rockmass geology distribution

表 1 隧道围岩地质概况、围岩级别

Table 1 Tunnel rockmass geology description and rockmass type

围岩	地质概况描述	级别	施工方法
泥炭系下统 C ₁	中厚层状砂砾岩、砂岩夹炭质页岩及千枚状页岩，褐黄色~紫红及灰白色，风化极严重~颇重，节理、裂隙发育，地下水不发育。	V 级	短台阶步
泥盆系中上统 3 段 D _{2,3} ^c	中厚层石英砂砾岩，石英砂岩夹千枚状页岩，灰白色夹紫红色，风化极严重~颇重，节理、裂隙发育；地下水不发育。	III 级	全断面法
泥盆系中上统 4 段 D _{2,3} ^d	千枚状页岩夹石英砂砾岩、石英砂岩，紫红色、灰绿色，风化极严重~颇重，节理、裂隙发育，地下水不发育。	IV 级	台阶步法

根据铁道部工程设计鉴定中心意见，金华山隧道内 IV 级软弱围岩地段选取 600 m 采用聚丙烯纤维网喷混凝土和锚杆（喷锚）作为初期支护试验，支护结构横断面如图 2 所示。试验段位置设计定为隧道中部 Dk134+020~+620，全长 600 m，分为 3 个连续的试段。分段 1 长 200 m，喷层厚度为 15 cm，纤维网掺量为 1.35 kg/m³；分段 2 长 200 m，喷层厚度为 10 cm，纤维网掺量为 1.8 kg/m³；分段 3 长 200 m，喷层厚度为 20 cm，纤维网掺量为 0.90 kg/m³。

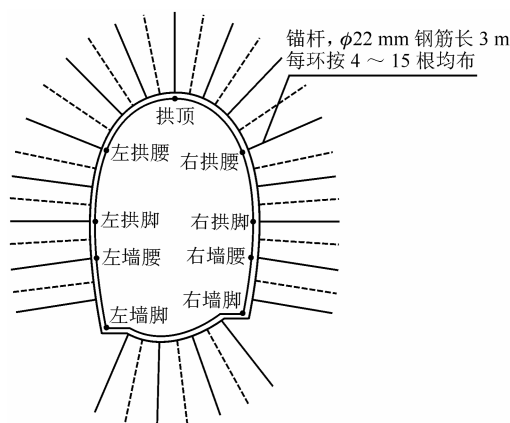


图 2 初期支护结构横截面示意图

Fig.2 Cross-section of tunnel early lining structure

金华山隧道湿喷纤维网混凝土支护结构如图 2 所示。在金华山隧道湿喷纤维网混凝土支护结构施工中，原材料基本情况如下：

(1) 采用山东泰安市现代塑料有限公司生产长度为 15 mm 的聚丙烯纤维网纤维，纤维的物理、力学性能：密度为 0.91 g/cm³，抗拉强度为 370 Mpa，抗拉弹性模量为 37 Gpa。无吸水性，强抗酸碱，断裂伸长率为 8 %。当量直径为 100 μm，分散性良

好，对人体安全性好。

(2) 水泥选择掺速凝剂后凝结快、保水性好，早期强度增长快，收缩较小。一般选用强度等级不低于 32.5 MPa 的普通硅酸盐水泥，当用于有严重硅酸盐侵蚀的环境时应选用抗硫酸盐水泥。矾土水泥不得使用，过期或受潮结块的水泥不得使用。

(3) 选用坚硬耐久的中粗砂，细度模数大于 2.5，其中直径小于 0.075 mm 的颗粒不应超过 20 %。

(4) 采用卵石或碎石均可，以前者为好。石子的级配应将大于 15 mm 粒径的颗粒控制在 20 % 以下。石子还应具有良好的化学稳定性，一些含有活性二氧化硅的岩石，不得用作喷射混凝土的骨料。石子的含泥量不得大于 1 %。

(5) 拌合用水与普通喷射混凝土要求相同，水中不应含有杂质。

4 支护结构可靠度分析

据隧道支护结构厚度实测统计资料分析，支护结构喷层厚度服从正态分布。金华山软弱围岩支护结构喷层混凝土厚度均值 $\mu = 20$ cm，变异系数 $\delta = 1.67$ cm。采用非线性有限元法和 2 次响应面对拱顶、拱腰、拱脚、墙腰、墙角部位的支护结构进行可靠度计算。

混凝土在双向应力作用下的 Kupfer 破坏准则可以表示为^[3]

在压-压区域，

$$f_c - \frac{(1+\alpha)^2}{(1+3.65\alpha)} \sigma_{2c} \geq 0, \quad \alpha = \sigma_{2c} / \sigma_{1c}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

在压-拉区域，

$$f_c - \frac{(1+\alpha)^2}{(1+3.28\alpha)} \sigma_{2c} \geq 0, \quad \alpha = \sigma_{2c} / \sigma_{1t}, \quad -0.17 \leq \alpha \leq 0 \quad (2)$$

有限元分析结果表明，金华山软弱围岩隧道拱顶、拱腰、拱脚、墙腰、仰拱部位的支护结构处于压-压受力状态，墙脚部位支护结构处于压-压受力状态。混凝土在双轴压力作用下强度要高于单轴压应力作用下的强度，为偏于安全起见，对隧道支护结构可靠度进行计算时功能函数取为喷层混凝土单轴抗压强度准则：

在压-压区域，

$$f_c - \sigma_c \leq 0 \quad (3)$$

隧道在掘进过程中，由于开挖面的约束效应，要求开挖面附近的围岩位移不能立即全部释放^[4-6]。实测结果表明，在掘进作业面后距离开挖面大约2~3倍洞径或洞跨处，掘进面的支撑约束作用差不多完全消失。台阶步施工时，掌子面和隧道初期支护之间保持1倍洞径距离，便于施工的开展，所以在应用平面应变有限元分析时应该考虑到开挖支护的空间效应，可采用位移释放系数来反映这一空间效应，本文采用多重单元法来近似考虑隧道开挖支护的空间效应。

分析结果表明，围岩位移释放系数与隧道截面形状、岩体材料特性、洞室埋深条件、施工方法等因素有着直接联系。具体施工时围岩应力释放率可以根据监控量测资料加以确定。在缺乏实测资料情况下可以按照工程类比法加以选定。文献[5]的研究结果，上台阶步开挖瞬间围岩应力释放率为30%，下台阶步开挖瞬间围岩应力释放率取为50%。本文假定上台阶步开挖时围岩应力释放率为30%，下台阶步开挖时围岩应力释放率为50%进行有限元分析，考察台阶步施工时围岩塑性区分布、隧道变形及支护结构受力特征。

取随机变量 h 的均值为抽样的中心点，取样本点为： $h_1 = \mu$ ， $h_2 = \mu + 3\delta$ ， $h_3 = \mu - 3\delta$ ，对每一样本点进行三维非线性有限元计算，求得拱顶、拱腰、拱脚、墙腰、墙角部位处的第一和第二主压应力，将这些主压力值代入功能函数中去，得到系数 a 、 b 、 c 的具体数值。由J-C法求得各个不同部位的可靠度指标 $\beta^{(1)}$ 分别如图3所示。

从图3(a)中可以看出，上台阶步完成后支护结构拱顶可靠度达到13.8379，左右拱脚位置处的可靠度为1.8078，为可靠度最小部位，对应的失效概率为0.0359，也是上台阶步完成后围岩塑性区最为严重的部位。从图3(b)中可以看出，下台阶步完成后支护结构拱顶可靠度为9.8067，较上台阶步完成后有所下降，左、右拱脚处的可靠度分别为5.9584，9.5492，左、右墙角处的可靠度指标分别为3.2447，0.4202，右墙角部位可靠度指标最低，对应的失效概率为0.3446，为最危险部位。表1为国际岩土工程标准的 $[\beta]$ 建议值，图3显示上台阶步完成后隧道支护结构拱顶、拱腰属于达到了一级

安全等级要求，下台阶步完成后，除右墙角外，拱顶、左拱腰、右拱腰、左拱脚、右拱脚、左墙腰、右墙腰、左墙角均得达到了一级安全等级要求。

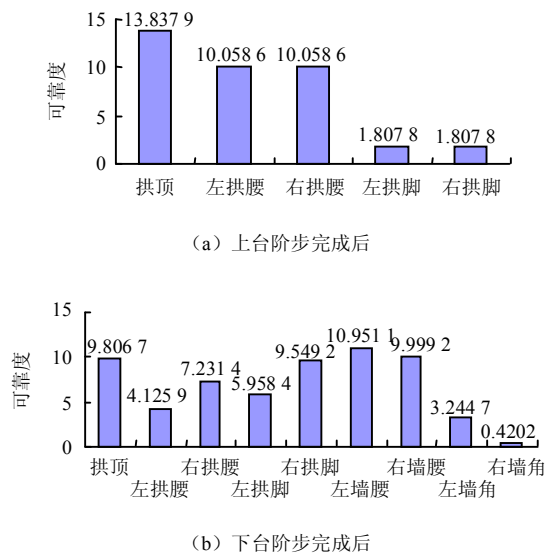


图3 支护结构可靠度

Fig.3 Tunnel lining structure reliability

表1 国际岩土工程标准的 $[\beta]$ 建议值^[2]

Table 1 Suggestion value of $[\beta]$ according to international geotechnical engineering standard

参数	安全等级		
	1级	2级	3级
$[\beta]$	3.6	3.4	3.2

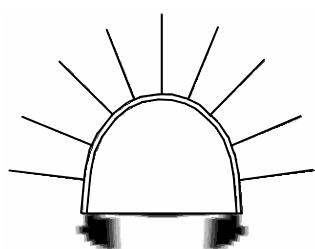
当喷层厚度分别为15，20 cm和25 cm时，上台阶步、下台阶步完成后支护结构各个部位最大压应力分布见表2。

表2 上台阶步完成后各部位最大压应力

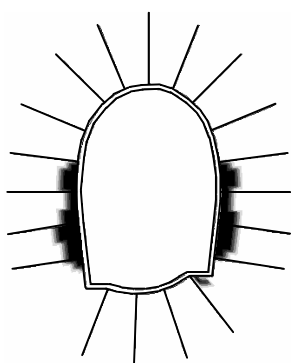
Table 2 Maximum compressive stresses for tunnel lining structure after upper step excavation

台阶	部位	不同支护结构厚度 (cm) 最大压应力		
		15	20	25
		15	20	25
上台阶	拱顶	-5.688 29	-5.216 55	-4.785 43
	右拱腰	-10.664 2	-9.646 77	-8.833 84
	右拱脚	-18.829 3	-16.071 1	-14.059 6
	拱顶	-6.590 23	-6.078 5	-5.614 61
	右拱腰	-10.362 6	-9.429 32	-8.565 81
下台阶	右拱脚	-6.674 57	-5.517 4	-4.155 71
	右墙腰	-5.754 96	-5.144 84	-4.609 54
	右墙角	-23.555 1	-19.877	-17.140 8
	左拱腰	-10.803 1	-9.218 59	-8.356 77
	左拱脚	-7.676 76	-6.867 04	-7.077 28
	左墙腰	-5.222 53	-4.783 45	-4.271 95
	左墙角	-17.414 4	-16.129 2	-14.893 5

当喷层厚度为均值 20 cm 时, 上台阶步、下台阶步完成后支护围岩塑性区分布如图 4 所示。从图中可以看出, 开挖上台阶步时塑性区主要集中在拱脚部分的围岩, 拱顶部分围岩未出现塑性区。上台阶步开挖完毕, 开挖下台阶部分后, 拱顶部位也未出现塑性区, 塑性区区域进一步扩展到曲墙墙腰以及拱脚部分, 塑性区范围得到进一步的扩大, 经过湿喷纤维混凝土后的隧道支护结构应力重分布得到较为明显的改善。隧道开挖锚喷支护完成后的洞室变形特征为: 拱顶出现下沉, 墙腰向内变形, 底板出现上鼓。



(a) 上台阶步完成后



(b) 下台阶步完成后

图 4 围岩塑性区分布

Fig.4 Rockmass plastic region distribution

5 结 论

湿喷纤维混凝土支护结构材料物理、力学参数均呈现出明显的随机性, 有些变量变异性相当大。由于混凝土破坏准则难以用支护材料参数显式表达

出来, 目前常用的结构可靠度计算方法难以应用于支护结构可靠度计算中去。本文提出将非线性有限元和二次响应面法相结合对湿喷纤维支护结构施工过程可靠度进行计算, 计算结果表明:

(1) 上台阶步开挖完成后支护结构可靠度最小值位于拱脚部位, 也是围岩塑性区最为严重部位; 下台阶步开挖完成后, 支护结构拱顶可靠度为 9.806 7, 较上台阶步完成后有所下降, 左、右拱脚处的可靠度分别为 5.958 4, 9.549 2, 左、右墙角处的可靠度指标分别为 3.244 7, 0.420 2, 右墙角部位可靠度指标最低, 对应的失效概率为 0.344 6, 为最危险部位。

(2) 开挖上台阶步时, 塑性区主要集中在拱脚部分的围岩, 拱顶部分围岩未出现塑性区; 上台阶步开挖完毕, 开挖下台阶部分后, 拱顶部位也未出现塑性区, 塑性区区域进一步扩展到曲墙墙腰以及拱脚部分, 塑性区范围得到进一步的扩大, 经过湿喷纤维混凝土后的隧道支护结构应力重分布得到较为明显的改善。隧道开挖锚喷支护完成后的洞室变形特征为: 拱顶出现下沉, 墙腰向内变形, 底板出现上鼓。

参 考 文 献

- [1] HUA Y, QI H B, JIANG Z Q. Study of the bending fatigue damage of the carbon and the polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. *Key Engineering Materials*, 2000, (183): 571—576.
- [2] 徐军, 郑颖人. 基于响应面方法的围岩参数随机反分析[J]. *岩土力学*, 2001, 22(2): 167—170.
- [3] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 120—133.
- [4] 铁道部第二勘察设计院. TB1003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005: 12—14.
- [5] 朱合华, 陈清军, 杨林德. 边界元法及其在岩土工程中的应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 305—308.
- [6] 夏永旭, 王文正, 胡庆安. 围岩应力释放率对双联拱隧道施工影响研究[J]. *现代隧道技术*, 2005, 42(3): 1—4.