

# 浅埋隧道空间结构体系可靠度研究

李志华<sup>\*1,2</sup>, 康海贵<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 岩体结构是受力岩体变形、破坏的内在依据, 而 Vanmarcke 随机场理论未能考虑围岩空间结构的变异性. 为此提出围岩物性参数空间等效方差增大函数这一概念, 用来反映岩体结构对衬砌综合作用的随机变异性. 同时运用 Weibull-Бологин 脆性破坏统计理论, 求得二次衬砌混凝土不同体积时的等效抗压强度, 进而将隧道衬砌空间结构体系可靠度计算化为平面问题. 研究发现, 隧道结构体系可靠度随其长度的增加而逐渐减小, 并将趋于一个稳定值.

**关键词:** 浅埋隧道; 围岩参数; 隧道结构体系可靠度; 等效方差增大函数

**中图分类号:** U451 **文献标志码:** A

## 0 引言

杨林德等<sup>[1]</sup>探讨了软弱岩层中钢筋混凝土隧道结构的单截面失效模式和整体失效模式, 对受拉和受压这两类失效模式分别给出了极限状态方程, 进而以条件概率和数值分析方法为基础, 建立了隧道断面体系可靠度计算的点估计法. 按该法求得的体系可靠度意味着同一类围岩地段各断面的失效概率是相同的<sup>[2]</sup>且与围岩长度无关. 但围岩空间结构的随机性以及随二次衬砌混凝土体积增长而不断增加的离散缺陷, 使得不大可能同类围岩全地段的所有断面都同时破坏或在同样部位破坏. 工程实践表明, 失效也不是仅仅在一个断面处, 而是在一定长度范围内发生. 设同种围岩段长度为  $L$ , 出现失效地段的长度为  $l$ , 一般  $l$  仅仅是  $L$  的一部分. 一些学者<sup>[3~5]</sup> 还曾试图用马尔可夫链描述可修复系统的失效状态转移过程, 通过微分方程组的特解求出系统的失效概率. 该方法需参考同类工程的破坏、维修情况来估算衬砌平均破坏区域的长度  $l_f$ , 对于缺少同类工程背景的大跨或特长隧道,  $l_f$  的取值很难确定. 同时, 按该理论求出的系统失效概率在实际应用中还出现了一些矛盾<sup>[2]</sup>.

本文受 Vanmarcke 建立的土体剖面随机场分析模型的启发, 并基于围岩空间结构变异性随其隧道长度增加而不断变大这一事实, 提出围岩物性参数等效方差增大函数这一概念, 将同类围岩长度范围内围岩空间结构随机性问题简化为平面随机性问题. 与此同时, 运用 Weibull-Бологин 脆性破坏统计理论, 求得二次衬砌混凝土不同体积时的等效抗压强度, 从而将同类围岩长度范围内的隧道体系可靠度问题简化为平面问题, 使问题得以简化而又能反映其本质.

## 1 围岩物性参数空间等效方差增大函数

对于一个统计均匀土层, Vanmarcke 提出的随机场理论是分析计算其空间平均特性的较好数学模型. 该理论用一个折减系数  $\Gamma$  把土的“点”变异性与空间变异性联系在一起, 使土的“点”统计参数转化为土的空间平均性质的统计参数颇为简洁<sup>[6]</sup>. 然而围岩并非是统计均质材料, 它包含大量的层面、节理面、断层面、片理面等开裂的不连续面, 这些分布杂乱无章、大小各异的不连续面在空间切割岩石, 形成具有控制其变形和破坏的围岩

空间结构体.但是, Vanmarcke 理论没能考虑围岩空间结构的随机变异性,而恰恰是这些因素,致使对衬砌综合作用的随机变异性很大.

谷德振<sup>[7]</sup>指出:尽管岩体稳定是一个极为复杂的问题,而岩体自身的结构是受力岩体变形、破坏的内在依据,也就是说岩体变形、破坏条件、方式和规模都是受岩体结构控制的.岩体结构是岩体结构单元排列、组合方式的总称.结构面和结构体是岩体结构的两个基本单元.结构面指层面、节理面、断层面、片理面等开裂的不连续面;被结构面切割成的岩块称为结构体.通过对国内外有代表性的围岩分类比较研究可以看出,绝大多数分类考虑的共同因素是岩体结构、岩石强度等.它们是反映岩石性质、岩体结构力学性能、围岩变形特征、稳定状态的主导因素,是岩体质量评价的基础<sup>[8]</sup>.结构面具有不同的等级,尺寸有大有小,大则延展数百米至数千米,小则仅局部地把岩体切割成岩块.

由于围岩具有不同的等级,每个等级当中包含有不同规模的结构面,且随围岩长度的增加,所包含各种各样的结构面的数量也在不断增加,致使围岩空间结构的变异性不断加大.本文通过对不同等级围岩平面物性参数的方差增大(即等效方差增大函数),来模拟随围岩长度增加而不断增长的空间结构变异性.等效方差增大函数的表达式为式(1),其图形如图 1 所示.

$$\sigma_i = \frac{2 \times (\sigma_{\infty i} - \sigma_{0i})}{\pi} \arctan(L - 1) + \sigma_{0i} \quad (1)$$

式中: $L$ 为同类围岩长度范围内隧道的长度, $\sigma_{0i}$ 为隧道断面(平面)内围岩第  $i$  个物性参数的方差, $\sigma_{\infty i}$ 为隧道空间内围岩第  $i$  个物性参数的方差上限.

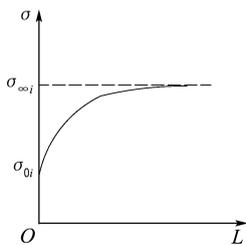


图 1 围岩参数空间等效方差增大函数

Fig. 1 Surrounding rock mass parameter space equivalent deviation increasing function

## 2 Weibull-Бологин 理论

设物体是由无数带有各种不同程度缺陷的基本单元所组成,程度不同的缺陷相应于不同的强度  $R$ . 缺陷的分布,亦即强度的分布是随机的,且服从某个分布函数  $F(R)$ . 按链条强度决定于其最弱环的强度假设,当试件某点的计算应力超过该点的缺陷强度时,试件就发生破坏.各点的计算强度可用第 I、第 II 或其他强度理论来计算.缺陷的分布函数  $F(R)$  即相当于缺陷的局部强度小于  $R$  的概率.对于均匀应力场情形,如某点的计算应力为  $R$ ,则该点不破坏的概率为  $1 - F(R)$ ,体积为  $V$  的试件共有  $nV$  个缺陷, $n$  为单位体积内缺陷的平均数.设试件各单元间的相互作用可略去不计,由于各点的计算应力相同,各点均不破坏的概率为  $[1 - F(R)]^{nV}$ ,而试件破坏的概率  $F_V(R)$  则为

$$F_V(R) = 1 - [1 - F(R)]^{nV} \quad (2)$$

统计理论中曾经证明如果分布函数  $F(R)$  满足下列两个条件<sup>[9]</sup>:

(i) 当  $R \leq S_0$  时  $F(R) = 0$ ,  $R > S_0$  时  $F(R) > 0$ ;

(ii) 对任意小量  $\epsilon > 0$  均满足条件

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{F(S_0 + \epsilon)}{\epsilon^\alpha} = C$$

此处  $C$  及  $\alpha$  为某个正数,则当  $nV \rightarrow \infty$ ,  $R \geq S_0$  时  $F_V(R)$  的渐近关系式为

$$\lim_{nV \rightarrow \infty} F_V(R) = 1 - \exp[-CnV(R - S_0)^\alpha] \quad (3)$$

对脆性材料来说,条件(i)是必定满足的,因为  $S_0$  可认为是缺陷强度的最小值.条件(ii)要求在大于  $S_0$  附近分布函数为正值,显然这条件也是容易满足的.对式(3)作变量替换

$$Cn = \frac{1}{V_0 S_C^\alpha}$$

此处  $V_0$  为某个标准试件的体积; $S_C$  为常数,是应力.于是式(3)变为

$$F_V(R) = 1 - \exp\left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{R - S_0}{S_C}\right)^\alpha\right] \quad (4)$$

试件的平均强度(数学期望)为

$$\bar{R} = \int_{S_0}^{\infty} R \frac{dF_V(R)}{dR} dR = S_0 + \int_{S_0}^{\infty} [1 - F_V(R)] dR \quad (5)$$

把式(4)代入式(5),并作变量替换

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^{1/\alpha} \frac{R - S_0}{S_C} = u \quad (6)$$

则得

$$\bar{R} = S_0 + S_C \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1/\alpha} \int_0^\infty e^{-u^\alpha} du \quad (7)$$

由式(7)可见,试件强度随着体积增大而减小,当  $V \rightarrow \infty$  时,  $\bar{R}$  趋向于最低强度  $S_0$ .

对于非均匀应力场情形,近似地把全部体积分成若干小体积,在每个小体积  $\Delta V_K$  内应力认为是均匀的,但  $\Delta V_K$  又包含足够多的缺陷数,以致仍可应用式(4),每个小体积不破坏的概率为

$$P_{\Delta V_K}(+) = \exp\left[-\frac{\Delta V_K}{V_0} \left(\frac{R_K - S_0}{S_C}\right)^\alpha\right] \quad (8)$$

整个试件破坏的概率为

$$P_V(-) = 1 - \prod_K P_{\Delta V_K}(+) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{V_0} \sum_K \Delta V_K \left(\frac{R_K - S_0}{S_C}\right)^\alpha\right] \quad (9)$$

设各点的计算强度可写成  $Rf(x, y, z)$ ,  $R$  为最大计算应力,  $f(x, y, z)$  为各点的量纲一坐标函数,则当  $\Delta V_K$  足够小,数目足够多时,有

$$F_V(R) = P_V(-) = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{V_0} \int_{Rf > S_0} \left[\frac{Rf(x, y, z) - S_0}{S_C}\right]^\alpha dV\right\} \quad (10)$$

应用式(7)并按式(6)作变量替换,可得试件平均破坏强度为

$$\bar{R}_* = S_0 + \int_{S_0}^\infty \exp\left[-\frac{g(R)}{V_0}\right] dR \quad (11)$$

其中

$$g(R) = \int_{Rf > 0} \left[\frac{Rf(x, y, z) - S_0}{S_C}\right]^\alpha dV \quad (12)$$

当  $S_0 = 0$  时,即得最初的 Weibull公式,此时计算得到极大简化.由式(7)、(11)、(12)可得

$$\bar{R}_* = \bar{R} \left(\frac{V}{V_*}\right)^{1/\alpha} \quad (13)$$

式中:  $V_* = \int_V [f(x, y, z)]^\alpha dV$ ,  $V = V(L, B, d)$ , 其中  $L$  为同类围岩衬砌的长度、 $B$  为隧道的跨度、 $d$  为衬砌厚度、 $\alpha$  为表征材料强度尺寸效应的常数(本文取 11.45<sup>[10]</sup>).

### 3 浅埋隧道围岩压力计算方法<sup>[11]</sup>

浅埋隧道围岩压力的计算公式最初于 1964

年提出,其推导思路是:隧道开挖后围岩发生变形,如图 2 所示,在中部岩柱  $EFHG$  下沉过程中,受两侧三棱体  $ACE$  和  $DBF$  的挟持,在竖直面  $EG$ 、 $FH$  上产生相互作用力  $T_1$ ,此力又反过来带动两侧三棱体下滑,形成破裂面  $AC$ 、 $BD$ .按极限平衡原理可求得隧道拱顶处围岩垂直压力为

$$q = \gamma h_1 \left(1 - \frac{h_1 \lambda \tan \theta}{B}\right) \quad (14)$$

其中  $\lambda$  为侧压力系数,由式(15)求得:

$$\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \phi_0}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \phi_0 - \tan \theta) + \tan \phi_0 \tan \theta]} \quad (15)$$

上式中  $\tan \beta$  由式(16)求出:

$$\tan \beta = \tan \phi_0 + \sqrt{\frac{\tan \phi_0 (\tan^2 \phi_0 + 1)}{\tan \phi_0 - \tan \theta}} \quad (16)$$

隧道拱顶和拱底处围岩水平压力由以下两式可得:

$$\sigma_H^1 = q\lambda \quad (17)$$

$$\sigma_H^2 = (q + \gamma h)\lambda \quad (18)$$

式中:  $q$  为隧道拱顶处围岩垂直压力;  $\beta$  为破裂角;  $\phi_0$  为岩石的内摩擦角;  $\theta$  为岩柱和两侧三棱体之间的摩擦角 ( $0 < \theta < \phi_0$ , 对于 II 类围岩一般取  $\theta = (0.5 \sim 0.7)\phi_0$ , 对于 III 类围岩一般取  $\theta = (0.7 \sim 0.9)\phi_0$ , 大于等于 IV 类围岩一般取  $\theta = 0.9\phi_0$ );  $h_1$  为洞顶处岩柱高度;  $\gamma$  为围岩容重;  $B$  为隧道毛洞宽度.

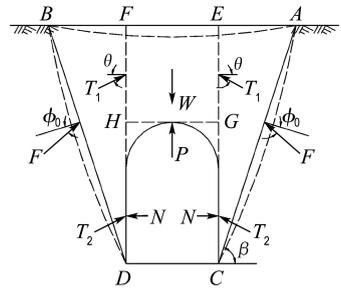


图 2 浅埋隧道围岩压力推导示意图

Fig. 2 Schematic of deduced surrounding rock mass pressure of shallow tunnel

### 4 算例

金州隧道位于大连市金州区北部约 6.5 km 处,原沈大高速公路西侧,采用单洞四车道隧道形式.隧道最大开挖宽度 22.482 m,高度 16.354 m,近似椭圆形,具有“亚洲第一大跨隧道”之美

称. 对于 II 类围岩浅埋段, 初期支护采用喷锚支护, 后期支护采用钢筋混凝土衬砌, 二次衬砌厚度为 750 mm, 两侧对称配筋直径为 25 mm, 间距为 125 mm, 混凝土标号为 C30, 拟求解该隧道浅埋段二次衬砌空间结构体系可靠度.

求解二次衬砌平面内力数字特征的计算模型如图 3 所示. 其中将围岩弹性反力系数  $K$ 、侧压力系数  $\lambda$ 、混凝土弹性模量  $E$ 、二次衬砌厚度  $h$ 、围岩垂直压力  $q$ 、围岩内摩擦角  $\tan \phi_0$  均视为随机变量, 其统计特征及概率分布见表 1.

在求解平面内控制截面可靠度时, 将混凝土的抗压强度  $f_c$ 、钢筋的抗拉强度  $f_y$ 、衬砌的厚度  $h$ 、二次衬砌的内力  $(N, M)$  视为随机变量, 其统计

特征及概率分布见表 2.

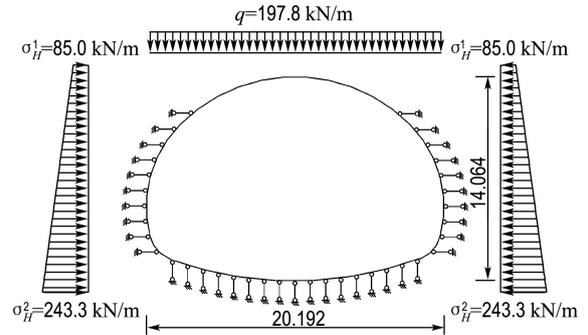


图 3 二次衬砌平面计算模型

Fig. 3 Calculation model of the secondary lining in plane

表 1 金州隧道浅埋段求解二次衬砌内力所需参数统计特征

Tab. 1 Parameters stat. character for solving the secondary lining internal force of shallow Jinzhou tunnel

特性	$K/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$\lambda$	$E/\text{MPa}$	$h/\text{m}$	$q/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$\tan \phi_0$
均值	133	0.43	$3.1 \times 10^4$	0.75	197 781.7	0.57
标准差	23.54	0.043	$0.264 4 \times 10^4$	0.075	3 955.6	0.12
分布类型	正态	正态	正态	正态	正态	正态

表 2 极限状态方程中各随机变量的统计特征

Tab. 2 Stat. character of random variables in limit states equation

特征	$f_c/\text{MPa}$	$f_y/\text{MPa}$	$h_0/\text{mm}$	拱顶		拱肩		拱脚		拱趾	
				N/N	M/(N·mm)	N/N	M/(N·mm)	N/N	M/(N·mm)	N/N	M/(N·mm)
分布类型	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态	正态
平均值	变值	351.944 4	680	1 841 700	611 010 000	2 339 300	596 920 000	2 653 700	776 810 000	1 686 400	569 200 000
标准差	0.878 3	2.969 4	68	式(1)	式(1)	式(1)	式(1)	式(1)	式(1)	式(1)	式(1)

功能函数为

$$\alpha_1 f_c b \frac{N h_0 + 2.2 f'_y A'_s h_0}{\alpha_1 f_c b h_0 + 4 f_y A_s} \times \left( h_0 - \frac{N h_0 + 2.2 f'_y A'_s h_0}{2 \alpha_1 f_c b h_0 + 8 f_y A_s} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a') - M = 0$$

隧道衬砌受力一般为小偏心受压<sup>[12]</sup>, 从营运部门角度出发, 一个截面被压碎即为破坏. 因此, 求出每个控制截面可靠度之后, 将各个控制界面组成串联体系, 再根据逐步等效线性化方法<sup>[13]</sup>求得隧道体系可靠度.

假定隧道围岩空间物性参数的方差值上限为  $K=42.3 \text{ MPa/m}$ ,  $\lambda=0.10$ ,  $q=11 866.8 \text{ N/m}$ . 经计算分析, 二次衬砌空间结构体系可靠度指标随

同类围岩长度的变化如图 4 所示.

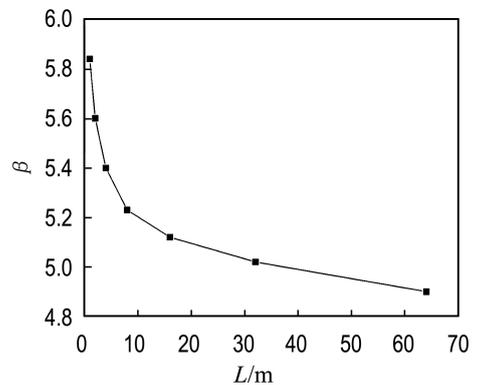


图 4 金州隧道结构体系可靠度计算结果

Fig. 4 Result of Jinzhou tunnel structural system reliability

## 5 结 语

岩体完整性作为围岩分类的一个重要指标,在国内外有关学术界和工程界已经得到普遍承认,并以多种形式反映在各个围岩分类方法之中.本文则通过围岩物性参数空间等效方差增大函数,来反映围岩空间结构的随机性问题.同时,基于 Weibull-Бологин 脆性破坏统计理论,求得二次衬砌混凝土不同体积时的等效抗压强度,进而将同类围岩长度范围内的隧道体系可靠度问题简化为平面问题.可以得出,隧道结构体系可靠度随其长度的增加而逐渐减小,并将趋于一个稳定值.但对每类围岩物性参数空间等效方差上限取值的大小还应进行进一步深入的探讨.

## 参考文献:

- [1] 杨林德,萧 蕤,罗立娜. 软弱围岩中隧道结构体系的可靠度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(16):705-709
- [2] 景诗庭,朱永全,宋玉香. 隧道结构可靠度[M]. 北京:中国铁道出版社, 2002
- [3] KOHNO Shigeyuki, ANG A H S, TANG W H.

- Reliability evaluation of idealized tunnel systems[J]. *Structural Safety*, 1992, 11:81-93
- [4] 武清玺,刘阿多. 隧洞结构截面与体系可靠度计算[J]. 河海大学学报, 1996, 24(2):56-61
- [5] 谭忠盛. 隧道支护结构体系可靠度的理论研究及其工程应用[D]. 成都:西南交通大学, 1998
- [6] 倪万魁,牛富俊,刘东燕. 黄土土性的空间自相关性研究[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(2):4-12
- [7] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社, 1979
- [8] 李世辉. 隧道支护设计新论[M]. 北京:科学出版社, 1999
- [9] 邬瑞锋. 脆性破坏统计理论的现状[J]. 大连工学院学报, 1964(1):89-99
- [10] 杨成球,吴 政. 全级配混凝土强度尺寸效应及变形特性研究[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(增刊1):S129-S134
- [11] 夏永旭,王永东. 隧道结构力学计算[M]. 北京:人民交通出版社, 2004
- [12] 颜建平. 软土隧道荷载分布规律的研究[D]. 上海:同济大学, 2004
- [13] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2003

## Research on space structural system reliability of shallow tunnel

LI Zhi-hua<sup>\*1,2</sup>, KANG Hai-gui<sup>1</sup>

( 1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. Environmental and Civil Engineering School, Jiangnan University, Wuxi 214122, China )

**Abstract:** Rock mass structure is a very important basis for its deformation and failure. However, Vanmarcke random field theory did not take into account the variability of space structure of surrounding rock. In order to describe the random variability of comprehensive actions of rock mass on lining, an equivalent deviation increasing function is put forward. And the Weibull-Бологин statistical theory for brittle materials is employed to find the equivalent compressive strength of tunnel secondary lining with different concrete volumes. Furthermore, the problem of space structural system reliability for shallow tunnel can be simplified as a plane problem. It is concluded that tunnel structural system reliability decreases along with the increase of tunnel structural length, and finally the reliability will trend towards a stable value.

**Key words:** shallow tunnel; surrounding rock parameter; tunnel structural system reliability; equivalent deviation increasing function