

深埋隧道空间结构体系可靠度分析

李志华, 孙秀丽, 华 渊

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 现行规范对隧道同类围岩中某一点的塌方高度进行了统计, 但未能考虑同类围岩长度范围内塌方高度的空间变异性, 为此提出了围岩塌方高度空间等效方差增大函数 $\sigma_h(L)$ 。同时运用 Weibull—Бологин 脆性破坏统计理论, 求得隧道空间结构所用混凝土的等效抗压强度 f_c^e ; 从而将同类围岩长度范围内的深埋隧道空间结构体系可靠度问题简化为平面问题。以金州隧道 III 类围岩深埋段隧道空间结构为研究对象, 分析了节理间距特征值、围岩塌方高度均方差上限, 隧道长度等因素对其体系可靠度的影响。计算结果表明, 节理间距特征值越大, 可靠度指标越高; 随着围岩塌方高度均方差上限及隧道长度的增长, 可靠度指标逐渐减小, 具有趋于稳定的趋势。

关键词: 深埋隧道; 空间结构; 体系可靠度; 塌方; 等效方差增大函数

中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)02-0040-06

Reliability Analysis of Space Structural System in Deep-buried Tunnel

LI Zhi-hua, SUN Xiu-li, HUA Yuan

(Environmental and Civil Engineering School, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Height of similar rockmass landslides in one tunnel section was processed with the statistical method in the existing design codes. However, the spatial variability within the similar rockmass length was not taken into account. In order to overcome the shortcomings, an equivalent deviation increasing function of the space rockmass landslides height $\sigma_h(L)$ was put forward. And the Weibull—Бологин statistical theory for brittle materials failure was employed to find the equivalent compressive strength of tunnel secondary lining with different concrete volumes. As a result, the problem of space structural system reliability for the deep-buried tunnel could be simplified as a plane problem. Taking the class III deep-buried rockmass in Jinzhou tunnel as an example, the characteristic values of joint spacing, variance upper limit of rockmass landslides height and the length of the tunnel to affect the system reliability were analyzed. And it was shown that the system reliability index increased with the increase of characteristic values. The system reliability index decreased gradually with the increase of variance upper limit of rockmass landslides height and the length of the tunnel. However, the reliability index would be towards a stable value at the end.

Key words: deep-buried tunnel; space structures; system reliability; landslides; equivalent deviation increasing function

隧道结构所处的地层条件复杂, 二次衬砌材料力学性能、几何尺寸、围岩力学参数及荷载等都是不确定的。评价隧道衬砌结构的安全程度, 用可靠度

方法比用安全系数法更加科学合理。中国《工程结构可靠度设计统一标准(GB 50153—92)》第 1.0.11 条明确提出“当有条件时, 工程结构宜按结构体系进

收稿日期: 2009-12-20

基金项目: 江南大学院长基金资助项目 (HT2008-6-5)

作者简介: 李志华 (1976-), 男, 博士, 主要从事隧道施工力学与安全性评估研究, (E-mail) lizhhdut@yahoo.com.cn.

行可靠度设计”。对于隧道结构来讲,目前已经有一些文献对其进行了研究^[1-8],但这些文献只是对同类围岩范围内典型断面处隧道结构体系可靠度进行了研究。然而,隧道结构是具有一定长度的空间结构体系,按上述方法求得的体系可靠度意味着同类围岩地段各断面的失效概率是相同的^[9]。但由于围岩空间结构面的随机性以及随二次衬砌混凝土体积增长而不断增长的离散缺陷,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。为此,基于现行规范^[10]中深埋隧道荷载统计特征,提出围岩塌方高度空间等效方差增大函数。另外,运用 Weibull—Бологин 脆性破坏统计理论,求得隧道空间结构所用混凝土的等效抗压强度。采用荷载—结构法,将同类围岩长度范围内的深埋隧道空间结构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 围岩塌方高度空间等效方差增大函数

在一定长度的同类围岩范围内,隧道围岩体被规模不等、方向各异、参数多变的结构面所分割。由于岩体破坏条件、方式和规模都是受岩体结构控制的,所以围岩对衬砌的空间作用非常复杂,用确定性的方法难以解决。岩体结构面的规模、方向及组合方式具有很强的不确定性,而深埋隧道围岩压力的大小正与上述这些因素有关,且围岩压力的变异性就与岩体结构的变异性有关。根据大量隧道塌方资料的统计分析,可找出隧道围岩破坏范围形状和大小的规律性。因此编制《铁路隧道设计规范(TB 1003—2005)》时,从铁路、公路和水工等隧道收集到塌方资料数据共 1 046 个,按萧维纳准则,舍去少量可疑数据后,还有 1 025 个,按不同的围岩级别对其进行统计分析,得到各级围岩塌方高度统计特征及其最佳分布概率模型。但上述统计分析是针对隧道同类围岩中某一点进行的,未能考虑该类围岩长度范围内的空间变异性。在隧道工程中,岩体参数的空间变异特征对于科学合理地求出围岩压力的大小及其变异性具有十分重要的意义。而围岩压力及其变异性的确定是进行隧道结构可靠度计算的主要环节之一,因此岩体参数的空间变异特征就成为研究隧道结构可靠度课题中的关键问题。

岩体结构面的规模、方向及组合方式具有很强的不确定性,凭借这一事实,用围岩塌方高度的变化来表征结构面对围岩整体稳定的消弱,之后将围岩

对衬砌的空间作用看做是随机函数的一次实现。由于随机函数是个有很大伸缩性的模型,适应面很广泛,所以对解决该问题不可能有很大帮助,因此,研究之中必须引入关于随机函数类型的假设。从地质统计学的角度出发,令围岩塌方高度 $h(x)$ 沿隧道轴方向的变化符合弱平稳假设是比较符合实际的。它由 2 个条件组成:1) 围岩塌方高度 $h(x)$ 的期望在所研究的同类围岩长度范围内是相同的;2) 围岩塌方高度 $h(x)$ 沿隧道轴方向的协方差存在,且只与 2 点之间的距离有关。因此,期望值为

$$E[h(x)] = m \quad (1)$$

而协方差为

$$E\{[h(x) - m][h(x+l) - m]\} = K(x, x+l) = K(l) \quad (2)$$

式中, l 为隧道同类围岩长度 L 范围内的一部分; $K(\cdot)$ 为随机函数的共变差函数。

塌方高度 $h(x)$ 的方差为

$$\text{VAR}[h(x)] = E\{[h(x) - m]^2\} = K(0) \quad (3)$$

因此,只有当 $\text{VAR}[h(x)]$ 有界时,这个过程的协方差方能存在。这是对塌方高度方差函数 $\text{VAR}[h(x)]$ 的第 1 个限制要求。

在很多情况下,在隧道同类围岩长度范围内,隧道开挖宽度相同,埋置深度相同,但由于围岩被不同的内在结构面切割,致使围岩塌方高度并不相同。也就是说,当 $l=0$ 时,方差函数 $\text{VAR}[h(x)]$ 具有初始值,称这一初值为塌方高度 $h(x)$ 方差下限,这是对方差函数 $\text{VAR}[h(x)]$ 的第 2 个限制要求。

岩体结构面具有不同的等级,尺寸有大有小,大者延展数百米至数千米,小则仅局部地把岩体切割成岩块。即使同类围岩等级当中,所包含的结构面规模也不相同。在围岩空间结构面影响范围内,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,致使围岩塌方方差函数 $\text{VAR}[h(x)]$ 不断加大。超出该影响范围之后, $\text{VAR}[h(x)]$ 逐渐趋于塌方高度方差上限。这是对方差函数 $\text{VAR}[h(x)]$ 的第 3 个限制要求。

能满足上述限制要求的模型有许多种,选择其中较简单的指数模型。在应用上要引入与随机变量 $h(x)$ 具有相同量纲的量 $\sqrt{\text{VAR}[h(x)]}$, 记为 $\sigma_h(L)$, 称为围岩塌方高度空间等效方差增大函数, 则:

$$\sigma_h(L) = \sigma_{h_0} + \Delta\sigma_h \times (1 - e^{-\frac{L}{t_0}}) \quad (4)$$

式中, L 为同类围岩沿隧道轴方向的长度, $m; \sigma_{h_0}$ 为隧道横断面(平面)内围岩塌方高度的均方差, 即均

方差下限; L_0 为节理间距特征值, m , 节理间距服从负指数分布^[11], 具有 95% 的概率小于或等于某一间距所对应的数值即为节理间距特征值; $\Delta\sigma_h$ 为围岩塌方高度的均方差上限与均方差下限之差, 即 $\Delta\sigma_h = \sigma_{h\infty} - \sigma_{h0}$, 其中, $\sigma_{h\infty}$ 为围岩塌方高度的均方差上限。

求出围岩塌方高度空间等效均方差之后, 利用误差传递函数, 即可求出围岩对隧道结构空间作用的变异性。

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, 所以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

$$F_V(R) = 1 - [1 - F(R)]^{nV} \quad (5)$$

统计理论中证明如果分布函数 $F(R)$ 满足下列 2 个条件^[12]: 1) 当 $R \leq S_0$ 时 $F(R) = 0$, $R > S_0$ 时 $F(R) > 0$; 2) 对任意小量 $\epsilon > 0$ 均满足条件 $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{F(S_0 + \epsilon)}{\epsilon^\alpha} = C$, 式中 C 及 α 为某个正数, 则当 $nV \rightarrow \infty$, $R \geq S_0$ 时的 $F_V(R)$ 的渐近关系式为

$$\lim_{nV \rightarrow \infty} F_V(R) = 1 - \exp[1 - C_n V (R - S_0)^\alpha] \quad (6)$$

对脆性材料来说, 条件 1) 是必定满足的, 因为 S_0 可认为是缺陷强度的最小值。条件 2) 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(6)作变量替换

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

式中 V_0 为某个标准试件的体积, S_C 为常数, 单位为应力。于是式(6)变为

$$F_V(R) = 1 - \exp\left[1 - \frac{V}{V_0} \left(\frac{R - S_0}{S_C}\right)^\alpha\right] \quad (7)$$

试件的平均强度(数学期望)为

$$\bar{R} = \int_{S_0}^{\infty} R \frac{dF_V(R)}{dR} dR = S_0 + \int_{S_0}^{\infty} [1 - F_V(R)] dR \quad (8)$$

把式(7)代入式(8), 并作变量替换

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^{1/\alpha} \frac{R - S_0}{S_C} = u \quad (9)$$

$$\text{则得} \quad \bar{R} = S_0 + S_C \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1/\alpha} \int_{S_0}^{\infty} e^{-u^\alpha} du \quad (10)$$

由式(10)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, 近似的把全部体积分成若干小体积, 在每个小体积 ΔV_K 内应力认为是均匀的。但 ΔV_K 又包含足够多的缺陷数, 以致仍可应用式(7), 每个小体积不破坏的概率为

$$P_{\Delta V_K}(+) = \exp\left[-\frac{\Delta V_K}{V_0} \left(\frac{R_K - S_0}{S_C}\right)^\alpha\right] \quad (11)$$

整个试件破坏的概率为

$$P_V(-) = 1 - \prod_K P_{\Delta V_K}(+) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{V_0} \sum_K \Delta V_K \left(\frac{R_K - S_0}{S_C}\right)^\alpha\right] \quad (12)$$

设各点的计算强度可写成 $Rf(x, y, z)$, R 为最大计算应力, $f(x, y, z)$ 为各点的无量纲坐标函数, 则当 ΔV_K 足够小, 数目足够多时, 有

$$F_V(R) = P_V(-) = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{V_0} \int_{Rf > S_0} \left[\frac{Rf(x, y, z) - S_0}{S_C}\right]^\alpha dV\right\} \quad (13)$$

应用式(10)并按式(9)作变量替换, 可得试件平均破坏强度为

$$\bar{R}_* = S_0 + \int_{S_0}^{\infty} \exp\left[-\frac{g(R)}{V_0}\right] dR \quad (14)$$

$$\text{其中, } g(R) = \int_{Rf > S_0} \left[\frac{Rf(x, y, z) - S_0}{S_C}\right]^\alpha dV \quad (15)$$

当 $S_0 = 0$ 时, 即得最初的 Weibull 公式^[13], 此时则得到极大简化。由式(10)、(14)、(15)可得

$$\bar{R}_* = \bar{R} \left(\frac{V}{V_*}\right)^{1/\alpha} \quad (16)$$

$$\text{式中: } V_* = \int_V [f(x, y, z)]^\alpha dV, V = V(L, B, d)$$

其中, L 为隧道同类围岩衬砌的长度; B 为隧道的跨度; d 为衬砌厚度; α 为材料强度尺寸效应的常数, 取 11.45^[14]。

3 隧道结构横断面失效模式

隧道衬砌是以轴力为主并承受地层反力的拱形结构, 为多次超静定结构。即使在发生弯曲开裂和钢筋屈服而使构件刚性降低的场合, 弯矩也会向刚

性没有降低的周围构件分配,某一处构件破坏不会立即造成整个结构的破坏^[15]。文献[1]针对软弱岩层中钢筋混凝土隧道结构的整体失效模式,提出投入运营后的隧道衬砌出现 3 个塑性铰时不仅外观已不安全,而且离发生整体失效已为期不远。因而对隧道结构整体失效模式,通常可按同时出现 3 个塑性铰评价隧道结构体系的极限承载能力。文献[16]针对素混凝土隧道衬砌结构边墙上由于膨胀岩层浸水后局部鼓出,使边墙产生 2 个塑性铰而导致整个衬砌结构遭到破坏,提出同时出现 2 个塑性铰评价隧道结构体系的极限承载能力。

作用在衬砌上的荷载 P 和净空位移 u 的关系如图 1 所示,荷载 P 在 1 处发生弯曲开裂(A 点)、钢筋屈服(B 点),接着即使达到混凝土的压缩极限应变(C 点),作为结构仍会保持稳定的状态。尽管到最大荷载(D 点)之前,位移、承载力仍然有一些富裕,但隧道衬砌结构控制截面当中的任何 1 个截面失效,都可能很快会导致整体结构失稳。混凝土是一种脆性材料,其抗压强度很高,而抗拉强度却很低。为了充分发挥混凝土材料的力学性能,通常将隧道衬砌设计成拱形结构,使之处于轴压或小偏压受力状态^[17]。笔者曾以金州隧道为例,将衬砌某控制截面轴力平均值减少 4σ ,弯矩平均值增加 4σ ,对二次衬砌结构的偏心状态进行判断,结果表明仍旧处于小偏心受压状态,也就是说二次衬砌近似以概率为 100% 的为小偏心受压。

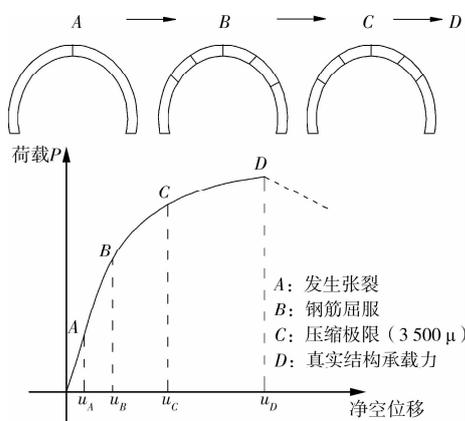


图 1 荷载与位移关系示意图^[10]

小偏心受压构件破坏特征都是轴向力作用侧的混凝土因达到抗压强度而压坏,故均可归类为受压破坏。这类破坏无明显预兆,压碎区段较长,混凝土强度越高,破坏越带突然性。当隧道衬砌结构出现一处小偏压破坏时,可能不会立刻导致衬砌结构的整体破坏。但在某些情况下,出现一处小偏压破坏

后如不及时整治,很快会导致衬砌结构其它位置处发生连锁破坏。一般情况下,隧道二次衬砌拱顶、拱肩和拱脚是隧道衬砌结构横断面内控制截面。按串联系统来处理隧道衬砌结构横断面失效的体系可靠度即使偏于保守一些,但还是切实可行的。另外,从营运管理部门来看,恐怕不会同意按出现一处以上破损作为断面的失效模式。综上所述,隧道衬砌结构横断面内的控制截面组成串联系统,该系统的失效概率即为隧道结构的失效概率。

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。对于 III 类围岩深埋段开挖宽度 22.382 m,高度 16.254 m,近似椭圆形。初期支护采用喷锚支护,后期支护采用钢筋混凝土衬砌,其厚度为 700 mm,两侧对称配筋直径为 25 mm,间距为 125 mm,混凝土标号为 C30。当各参数及荷载取平均值时,衬砌的轴力图见图 2,弯矩图见图 3。

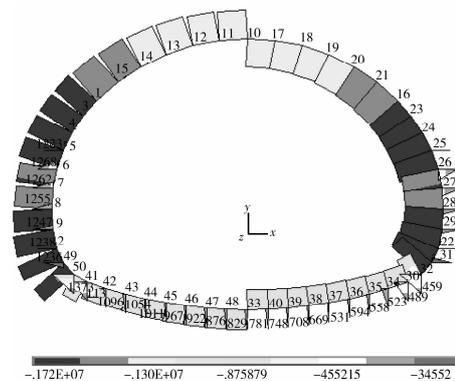


图 2 衬砌轴力图

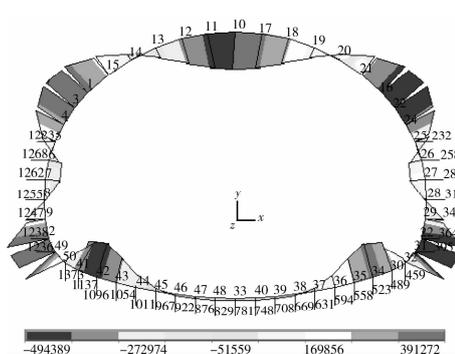


图 3 衬砌弯矩图

钢筋混凝土矩形截面小偏心受压构件正截面受压承载力为:

$$N = \alpha f_c b x + f_y' A_s' - \sigma_s A_s \quad (17)$$

$$\sigma_s = (\xi - 0.8) f_y / (\xi_b - 0.8) \quad (18)$$

$$M = \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_y A'_s (h_0 - a') \quad (19)$$

混凝土强度小于 C50, 所以 $\xi_b = 0.55$, 将式(17)、(18)代入式(19)可得功能函数

$$\alpha_1 f_c b \frac{N h_0 + 2.2 f'_y A'_s h_0}{\alpha f_c b h_0 + 4 f'_y A'_s} (h_0 - \frac{N h_0 + 2.2 f'_y A'_s h_0}{2 \alpha f_c b h_0 + 8 f'_y A'_s}) + f'_y A'_s (h_0 - a') - M = 0 \quad (20)$$

式中混凝土等效抗压强度 f_c 平均值按式(16)求得, 变异系数为 0.16; 钢筋屈服强度 f_y 平均值为 351.94 MPa, 变异系数为 0.06; 厚度 h 平均值为 700 mm, 变异系数为 0.1; 衬砌内力平均值与标准差通过有限元和误差传递函数计算。隧道横断面(平面)内围岩塌方高度的平均值 $h = 2.4063$ m, 均方差 $\sigma_{h_0} = 0.9573$ m, 围岩容重为 22.0 kN/m³。

令围岩塌方高度的均方差上限 $\sigma_{h_{\infty}} = 2.0\sigma_{h_0}$ 。拱顶可靠度指标 β 与节理间距特征值 L_0 的关系见图 4, 其中 D 为隧道开挖宽度。从图 4 中可以看出: 当隧道长度一定时, 可靠度指标 β 随节理间距特征值 L_0 的增加而增大。从统计角度来说, 随着围岩节理间距特征值 L_0 变大, 围岩整体性越来越好, 因而隧道空间结构可靠度就越来越高。

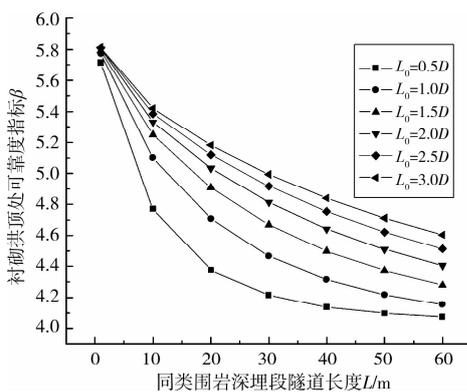


图 4 L_0 与可靠度指标的关系

拱顶可靠度指标 β 随围岩塌方高度均方差上限 $\sigma_{h_{\infty}}$ 的变化关系见图 5, 从图 5 中可以看出, 随着隧道长度的增加, 围岩塌方高度均方差上限越大, 对应的可靠度指标越小, 且随隧道长度的增加, 这种变化趋势越来越明显。当内力平均值一定时, 可靠度指标的大小取决于参数的均方差。围岩空间结构面沿隧道轴向方向对围岩的切割程度以及组合方式是随机分布的, 并且对于同一围岩类别, 这种分布的变异性随隧道长度的增加而增加。当隧道长度较短时, 不同围岩等级当中结构面分布的变异性基本相当, 因此对应的可靠度指标基本相同。随着隧道长度的增

加, 不同围岩类别当中结构面分布的变异性越来越明显, 围岩类别越差, 被结构面切割的越破碎, 结构面分布的变异性越大, 对应的可靠度指标就越小。

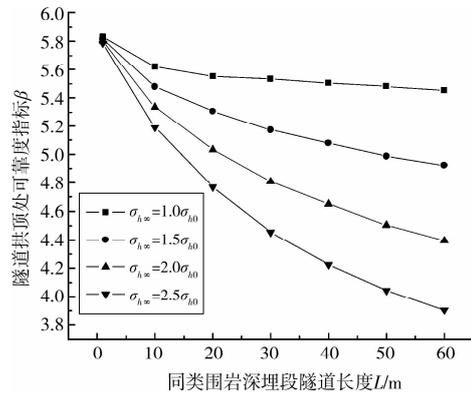


图 5 均方差上限与可靠度指标的关系

求出拱顶、拱肩、拱脚控制截面可靠度之后, 将其组成串联体系, 再根据逐步等效线性化方法求其体系可靠度。深埋段隧道空间结构体系可靠度与该段隧道长度的关系见图 6, 可以看出隧道空间结构体系可靠度随其长度的增加而逐渐减小, 并有趋于稳定值的趋势。随着隧道沿长, 二次衬砌所用混凝土的体积不断增长, 其空间结构等效抗力不断减小, 且围岩塌方高度变异性逐渐增大, 因此隧道空间结构体系可靠度随其长度的增加而逐渐减小。同时上述变量呈指数型关系递减(增), 因此随着隧道沿长可靠度指标趋于稳定值。

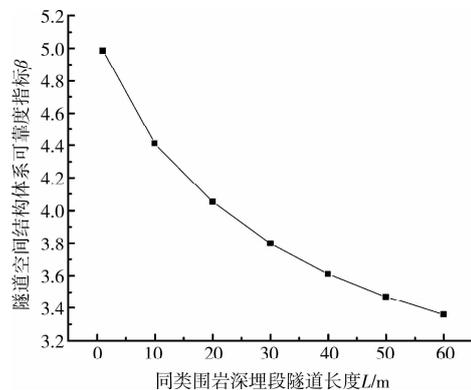


图 6 隧道空间结构体系可靠度与隧道长度的关系

5 结论

通过围岩塌方高度空间等效方差增大函数 $\sigma_h(L)$ 和 Weibull—Бологин 脆性破坏统计理论, 基于荷载—结构模型, 求解了同类围岩长度范围内深埋隧道空间结构体系可靠度。以金州隧道 III 类围岩深埋段隧道空间结构为例, 对其进行体系可靠度分析,

得出如下结论:

1) 当隧道长度一定时,隧道结构可靠度指标 β 随节理间距特征值 L_0 的增加而增大;

2) 沿隧道长度方向围岩塌方高度均方差上限 $\sigma_{h\infty}$ 越大,对应的隧道结构可靠度指标 β 越小,且随隧道长度 L 的增加,这种变化趋势越来越明显;

3) 隧道空间结构体系可靠度 β 随其长度的增加而逐渐减小,具有趋于稳定值的趋势。

对每类围岩塌方高度均方差上限取值的大小还应进一步探讨。

参考文献:

- [1] 杨林德,萧蕤,罗立娜. 软弱岩层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.
YANG LIN-DE, XIAO RUI, LUO LI-NA. Structural system reliability for tunnel lining in weak rock [J], Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(16): 705-709.
- [2] 施成华,彭立敏. 连拱隧道不同施工阶段结构体系可靠度计算[J]. 岩土力学,2008,29(5):1299-1304.
SHI CHENG-HUA, PENG LI-MIN. Study on system reliability of double span tunnel during different construction stages [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1299-1304.
- [3] 宋玉香,景诗庭,朱永全. 隧道结构系统可靠度研究[J]. 岩土力学,2008,29(3):780-784.
SONG YU-XIANG, JING SHI-TING, ZHU YONG-QUAN. Research on reliability of tunnel structural system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 780-784.
- [4] 赵洪波,茹忠亮,张士科. SVM在地下工程可靠性分析中的应用[J]. 岩土力学,2009,30(2):526-530.
ZHAO HONG-BO, RU ZHONG-LIANG, ZHANG SHI-KE. Application of support vector machine to reliability analysis of underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 526-530.
- [5] YANG CY, XU MX, CHEN WF. Reliability analysis of shotcrete lining during tunnel construction[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2007, 133(12): 975-981.
- [6] LASO E, LERA M, SAGRARIO G, et al. Level II reliability approach to tunnel support design [J]. Applied Mathematical Modelling, 1995, 19(6): 371-382.
- [7] HARRAZ A, EI-MELIGY M, DIF A. Probabilistic-based codified design of tunnels [J]. Journal of Engineering and Applied Science, 1999, 46(5): 853-872.
- [8] HARRAZ A, MELIGY M, DIF A. Reliability analysis of tunnels[J]. AEJ - Alexandria Engineering Journal, 1998, 37(6): 135-144.
- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国铁道部. TB 1003-2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [11] 张继春. 岩体爆破的块度理论及其应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2001.
- [12] 苏良军. 高等数理统计[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
- [13] KHANDAKER M, DHORJE M, EKWARO-OSIRE S. Modified weibull failure theory for size effect prediction of brittle thin film[C]// American Society of Mechanical Engineers. Materials Division (Publication) MD. 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 05-10, 2006, Chicago, IL. New York: ASME, C2006: 557-564.
- [14] 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(S1):129-134.
YANG CHENG-QIU, WU ZHENG. Investigation of size effect on strength and deformation behavior of full mix concrete [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997, 37(S1): 129-134.
- [15] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [16] 杨成永,刘维宁,张弥. 隧道素混凝土衬砌结构的极限状态[J]. 北方交通大学学报,1999,23(4):53-55.
YANG CHENG-YONG, LIU WEI-NING, ZHANG MI. Plain concrete tunnel lining structure limit state[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(4): 53-55.
- [14] 颜建平. 软土隧道荷载分布规律的研究[D]. 上海:同济大学,2004.

(编辑 胡英奎)