

双连拱隧道围岩稳定性的模糊概率分析研究

申玉生, 赵玉光

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 结合宜(宾)水(富)高速公路鞋底坡双连拱隧道实际工程, 利用曲线回归和模糊概率方法对隧道围岩稳定性概率进行计算分析。把围岩水平位移的收敛曲线分为单阶式位移收敛曲线和台阶式位移收敛曲线两种类型, 对应于收敛曲线分别用双曲线函数和 Boltzman 函数对其进行回归分析, 并应用模糊概率公式对隧道的稳定性概率进行计算。

关键词: 隧道工程; 回归分析; 模糊概率; 连拱隧道

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)11-1358-04

作者简介: 申玉生(1976-), 男, 山东临朐县人, 博士研究生, 主要从事软弱围岩双连拱隧道综合修建技术研究。

Research on fuzzy probability analysis of stability of surrounding rock in double-arch tunneling

SHEN Yu-sheng, ZHAO Yu-guang

(School of civil engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In the practical project of the Xiedipo tunnel of Yishui Yibin-Shuifu Expressway highway, the stability of double-arch tunnel was analyzed and calculated by the regression analysis and fuzzy probability. The displacement convergence curves of surrounding rock were firstly divided into two types (single-step displacement convergence curve and double-step displacement convergence curve), which had been regressed by use of the hyperbola function and Boltzman function respectively. Furthermore, the stability of tunnel was calculated with the formula of fuzzy probability. The present formula and experience could be referenced in the design, construction and researches of similar tunnels.

Key words: tunneling engineering; regression analysis; fuzzy probability; double-arch tunnel

0 前 言

随着山区高等级公路建设在我国的展开, 公路隧道建设规模正以空前的速度发展。公路隧道受到山岭重丘区的线型、展线及隧址区工程地质情况等因素的影响, 线路中多采用了双连拱隧道施工方案^[1]。连拱隧道由于跨度较大(双车道大于 20 m, 三车道达到 30 m 以上), 结构复杂, 左右主洞开挖与支护交错进行, 使得围岩位移变化变得尤为复杂。全国各地已建成不少连拱隧道, 但在连拱隧道的设计施工中, 目前仍缺少有效的可以类比的工程可借鉴^[2, 3], 尤其是双连拱隧道围岩稳定性分析方面有待于进一步研究。

目前国内外隧道工程施工主要应用经验法, 处于定性设计水平, 如果在隧道施工过程中, 按照一定的判断准则及时有效地分析与预测围岩稳定性, 根据获得的现场量测信息进行反馈修正和完善原设计, 那么隧道工程支护设计就会向定性定量结合的设计水平发展。各类规范中判别隧道围岩稳定性的方法均属于定值判别法, 确定位移判据的因素较为复杂, 要从一个范围中确定合适的定值判据比较困难, 用概率法代

替定值法判别隧道稳定性较为合理。本文结合鞋底坡双连拱隧道水平位移收敛的监测数据, 利用模糊概率的方法对隧道围岩稳定性进行了分析研究。

1 工程概况

宜水高速公路鞋底坡连拱隧道, 位于四川省宜宾市凉水井乡, 隧道轴向近南北方向, 里程为 k107+305~k107+750, 长 445 m, 隧道建筑限界净宽 22 m, 净高 5 m, 隧道最大埋深 63 m。隧址区揭露地层有第四系坡残积层的棕红色亚砂土、亚粘土和侏罗系中统上沙溪庙组的棕红色粉砂质泥岩、泥岩粉砂岩和细砂岩的不等厚互层, 以 IV、V 级围岩为主。隧道轴线左侧有 4 个水塘, 距隧道开挖线水平距离分别为 64 m, 12 m, 60 m, 112 m, 水塘底至隧道洞底的垂直距离为 22~26 m。

隧址区位于宜宾背斜的南端马蹄形收敛部, 走向从宜宾端渐变到水富端, 与隧道轴线几乎平行。岩层

单斜, 产状: $310^\circ \angle 13^\circ \sim 17^\circ$, 区内主要发育三组节理。地下水类型主要有基岩风化带裂隙水、松散层上层滞水。地下水类型为重碳酸·硫酸钙型, 其 pH 值 6.0, 对混凝土具分解类弱腐蚀性。

鞋底坡双连拱隧道的施工方法为中导坑拓展法(中导坑先施工, 后两侧主洞上下台阶法错开施工)。隧道横断面及施工工序安排见图 1。支护型式采用柔性支护体系结构的复合式衬砌, 以锚杆、喷射混凝土、单层钢筋网和格栅钢架为初期支护, 模筑钢筋混凝土为二次支护。

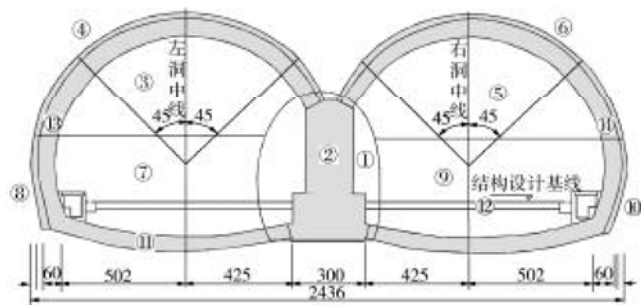


图 1 鞋底坡双连拱隧道设计断面与施工顺序(①-⑭)

Fig. 1 Cross section and construction sequence in the Xiedipo double-arch tunnel

2 模糊概率公式建立

根据参考文献[4], 用隧道周边位移判别隧道稳定性是一个模糊随机事件, 可用模糊概率来表示, 设在某个时刻位移值为 u 时隧道保持稳定的概率为

$$P(x) = \int_0^{\infty} p(x)\mu_A(x)dx, \quad (1)$$

式中 $p(x)$ 为实测位移概率密度函数, $\mu_A(x)$ 为隶属函数。

假定隧道位移概率密度为正态分布, 在式(1)中概率密度函数表达式为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\delta\sigma}} \exp\left\{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (2)$$

式(1)中隶属函数是表示隧道位移发展与隧道稳定程度之间的关系, 在某个位移之前隧道没有任何失稳因素和迹象发生, 这个位移段的稳定隶属度为 1。位移发展到某个数值时, 隧道完成丧失稳定, 这个位移叫极限位移, 它的稳定隶属度为 0。因此, 这一隶属函数是在 $[0, 1]$ 闭区间的连续函数。从概率和统计的角度看, 这个极限位移不可能是定值, 而是模糊随机变量, 它具有统计特征。设统计得到的极限位移概率密度为 $f(x)$ (图 2、图 3)。极限位移是失稳的标志, 当位移到 $x=a$ 时, 失稳概率为 $\int_0^a f(x)dx$, 而稳定概率为 $1 - \int_0^a f(x)dx$, 即位移为 a 时的稳定隶属度。因此, 各位移量对隧道稳定性的隶属函数为

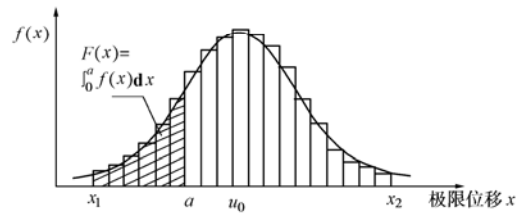


图 2 极限位移概率密度函数曲线

Fig. 2 Probability density function curves of limit displacements

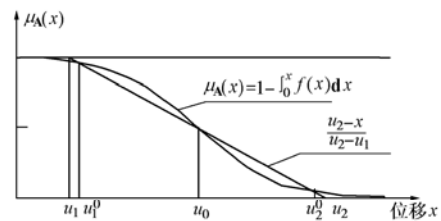


图 3 隶属函数曲线

Fig. 3 Membership function curves

$$\mu(x) = 1 - F(x) = 1 - \int_0^a f(x)dx, \quad (3)$$

用图形表示即为图 3 的隶属函数曲线。将式(3)代入式(1)后出现双重积分, 计算比较烦琐。考虑到 $\pm 2\sigma_0$ 间有 95.44% 保证率关系, 将图 3 中 $\mu_A(x)$ 曲线上代表中值 μ_0 及 $\pm 2\sigma_0$ 的三点连成一条直线, 用它代替曲线 $\mu_A(x)$, 此直线与上下两渐近线相交于 μ_1 及 μ_2 , 隶属函数可简化为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & (0 < x \leq u_1) \\ \frac{u_2 - x}{u_2 - u_1} & (u_1 < x \leq u_2) \\ 0 & (x > u_2) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 u_1, u_2 和极限位移值有关。将规范中各范围值平均分为两段, 假定符合正态分布, 极限位移 95% 在其中一段内, 设为 $u_1^0 \sim u_2^0$ 。其中间值 $u_0 = (u_1^0 + u_2^0)/2$, 而 $u_1^0 = u_0 - 2\sigma_0, u_2^0 = u_0 + 2\sigma_0$, 求得标准差 $\sigma_0 = (u_2^0 - u_1^0)/4$ 。用直线代替曲线后(图 3), 按几何关系, 要满足 $u_1^0 \sim u_2^0$ 有 95% 的失稳概率, 则得出 $u_1 = u_1^0 - \frac{u_2^0 - u_1^0}{38}, u_2 = u_1^0 + \frac{u_2^0 - u_1^0}{38}$ 。

把式(2)、(4)代入式(1), 引入标准正态函数得

$$P(x) = \int_0^{u_1} \frac{1}{\sqrt{2\delta\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right] dx + \int_{u_1}^{u_2} \frac{u_2 - x}{u_2 - u_1} \frac{1}{\sqrt{2\delta\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right] dx = \Phi\left(\frac{u_1 - u}{\sigma}\right) + \Omega\left(\frac{u_2 - u_c}{u_2 - u_1}\right), \quad (5)$$

式中 正态曲线面积 Ω 为

$$\Omega = \left[\Phi\left(\frac{u_2 - u}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{u_1 - u}{\sigma}\right) \right] \quad (6)$$

式 (5) 中, 正态曲线面积的形心

$$u_c = u + \frac{\sigma}{\sqrt{2\delta\Omega}} \left\{ \exp\left[-\frac{(u_1 - u)^2}{2\sigma^2}\right] - \exp\left[-\frac{(u_2 - u)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} \quad (7)$$

以上公式中 $\Phi\left(\frac{u_i - u}{\sigma}\right)$ 均由标准正态分布函数表

查得, 将式 (6) 和 (7) 计算结果代入式 (5) 即得隧道在某个位移值时稳定性概率, 即只要将回归曲线预测得到的最大位移值 u 和相应的标准差 σ (也可以用相应的位移速率均值和标准差计算), 就可以计算出隧道稳定概率。

3 隧道稳定性模糊概率分析

围岩变形位移是围岩力学形态变化最直观的表现, 通过对位移量测结果的分析可以正确判断围岩应力的发展趋势、围岩稳定性及最大速率变化、最终位移量、支护参数的合理性及它们之间的相互关系, 辅以其它观测方法, 还可以为数据分析处理和信息反馈提供可靠的第一手资料^[5]。

在双连拱隧道的施工过程中, 由于左右主洞施工工序相互干扰和影响, 隧道周边位移收敛情况较为复杂, 根据鞋底坡双连拱隧道围岩位移收敛结果分析, 按最终位移收敛时态曲线可以分为两种类型: 一种与单拱隧道类似的单阶式位移收敛曲线; 另外一种为台阶式位移收敛曲线 (存在至少两个收敛平台)。单阶式位移收敛曲线在一般隧道中经常遇到的一种类型, 而台阶式位移收敛曲线一般是由于同一隧道中两施工工序之间相互干扰或时间间隔较长而引起的一种围岩变形形式。

在鞋底坡双连拱隧道的变形监测中, 共埋设 44 个量测断面, 针对隧道不同的施工工序, 全方位对围岩变形进行监测, 取得了大量可靠的现场围岩位移变形监测资料。

3.1 单阶式位移收敛曲线

在数据处理过程中, 分别采用不同函数^[6]指数函数、对数函数、双曲函数以及多项式对围岩位移的时态曲线进行了回归分析, 最后采用回归精度较高的双曲线函数对双连拱隧道水平位移时态曲线进行回归分析 (图 4)。

在隧道的施工过程中, 选取 IV 级围岩 K107+400 断面为分析对象, 图 4 为隧道右洞水平位移收敛时态曲线与回归曲线, 由于隧道左洞施工已经结束, 右洞的围岩水平位移在较短时间内就趋于收敛。

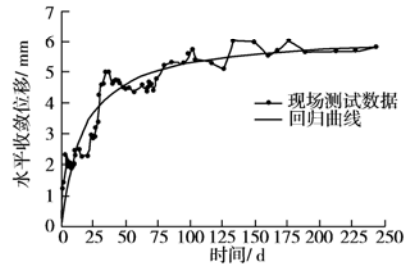


图 4 隧道右洞 K107+400 水平收敛时态曲线

Fig. 4 Horizontal convergence time curve in the right tunnel

隧道右洞 K107+400 量测断面回归方程为

$$u = t / (0.161t + 2.841) \quad (8)$$

回归方程曲线见图 4, 其相关系数为 0.8944, 按回归方程 (8) 计算第 244 d 时最大位移值为 5.799 mm, 同时刻的位移标准差可由式 (9) 求出如下

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u}_i)^2} = 1.00(\text{mm}) \quad (9)$$

式中 n 为测点数, u_i 为实测值, \bar{u}_i 回归方程计算值。

按规范^[7]确定位移上下限, 求解隧道的隶属函数, 在隧道埋深小于 50 m 的 III 类围岩中, 隧道相对位移值允许范围为 0.15%~0.5%, 由此可以求出

$$u_1 = u_1^0 - \frac{u_2^0 - u_1^0}{38} = 0.15 - \frac{0.5 - 0.15}{38} = 0.141\%$$

$$u_2 = u_1^0 + \frac{u_2^0 - u_1^0}{38} = 0.5 + \frac{0.5 - 0.15}{38} = 0.509\%$$

把 u_1 、 u_2 代入式 (4), 求出隶属函数

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & (0 < x \leq 0.141), \\ \frac{0.509 - x}{0.509 - 0.141} & (0.141 < x \leq 0.509), \\ 0 & (x > 0.509). \end{cases}$$

然后代入式 (5), 求解隧道稳定性。

隧道单洞跨度为 11 m, 可以知道最大位移为 5.799 mm 时隧道稳定概率。相对最大水平收敛 $u = 5.799 / 11000 = 0.0527\%$, 相对标准差 $\sigma = 1.0 / 11000 = 0.009\%$ 。因此, 把 u_1 、 u_2 、 u 和 σ 值代入公式 (6)、(7)、(5), 可以求解隧道稳定性概率

$$P(v) = \Phi\left(\frac{u_1 - u}{\sigma}\right) + \Omega\left(\frac{u_2 - u_c}{u_2 - u_1}\right) = \Phi\left(\frac{0.141 - 0.0527}{0.009}\right) = 1$$

由此可知该断面在最大位移为 5.799 mm 时, 隧道稳定性概率为 100%, 施工可以安全顺利进行。

3.2 台阶式位移收敛曲线

在双连拱隧道施工过程中, 后施工的主洞易形成台阶式收敛曲线 (图 5), 形成第一台阶是隧道左洞上台阶施工时隧道围岩变形反馈, 第二台阶是由于右洞施工及左洞下台阶施工时隧道围岩变形的反馈。

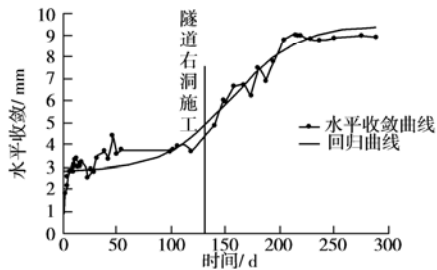


图 5 隧道左洞 K107+640 断面水平收敛时态曲线

Fig. 5 Horizontal convergence time curves in the left tunnel

以隧道左洞 K107+640 量测断面 (L640) 为分析对象, 对台阶式水平位移收敛曲线进行分析, 此类型的曲线可采用 Boltzman 函数进行回归分析, L640 断面的水平位移收敛曲线的回归方程为

$$y = 9.43 - \frac{6.63}{1 + e^{\frac{t-155.64}{30.75}}} \quad (10)$$

初始位移为 2.84 mm, 相关系数为 0.9428。按方程(10)计算第 289 d 时最大位移值为 9.347 mm, 同时刻的位移标准差按式 (9) 求解, $\sigma = 1.214$ mm。

相对最大水平收敛 $u = 0.9347 / 11000 = 0.085\%$, 相对标准差 $\sigma = 1.214 / 11000 = 0.011\%$ 。因此, 把 u_1 、 u_2 、 u 和 σ 值代入公式 (5)、(6)、(4), 可以求解隧道稳定概率即

$$P(v) = \Phi\left(\frac{u_1 - u}{\sigma}\right) + \Omega\left(\frac{u_2 - u_c}{u_2 - u_1}\right) = \Phi\left(\frac{0.141 - 0.085}{0.011}\right) = 1。$$

由此可知该断面在最大位移为 9.347 mm 时, 隧道稳定概率为 100%, 施工可以安全顺利进行。

由图 4 和图 5 可以看出, 台阶式水平收敛曲线最终收敛位移比单阶水平收敛曲线大 3.55 mm。隧道在右洞未施工前, 对左洞水平位移收敛曲线可遵循单阶式位移收敛曲线变化规律, 用双曲线函数进行回归分析, 对隧道进行稳定性分析。如果其它施工工序引起隧道围岩位移突变, 则考虑台阶式位移收敛曲线变化规律, 并及时进行隧道围岩稳定性分析。在现场只要把参数 u 、 σ 、 u_1 和 u_2 输入式 (5), 即可得到 $P(v)$ 值, 用普通计算器在现场也会很快计算出隧道在某个位移值时能够保持稳定的概率。在鞋底坡双连拱隧道施工过程中, 用曲线回归分析及模糊概率公式及时对围岩变形的反馈信息进行计算分析(隧道稳定性概率), 保证了隧道施工的安全顺利进行。

在任何连拱隧道的施工过程中, 均存在不同程度上偏压荷载, 主要是由自然因素偏压(地形、地层和构造等)或人为因素偏压(施工偏压)引起的。偏压

荷载给连拱隧道设计和施工带来了很大的困难, 加强围岩变形的监测并及时对围岩变形曲线进行回归分析, 应用模糊概率方法对隧道的施工过程进行稳定性判别, 是保证了隧道安全顺利施工重要方法。

4 结 论

(1) 通过曲线的回归分析, 首次对双连拱隧道围岩水平位移收敛曲线的类型进行分类, 分为与单拱隧道类似的单阶式位移收敛曲线和台阶式位移收敛曲线(存在至少两个收敛平台)两种类型, 两种曲线能够较好地反映连拱隧道围岩变形趋势。

(2) 用双曲线函数和 Boltzman 函数分别对单阶式位移收敛曲线和台阶式位移收敛曲线进行回归分析, 取得了较高的拟合精度, 有利于分析围岩位移收敛趋势。如果水平位移收敛未出现台阶式曲线前, 则按照双曲线函数对量测数据进行回归分析, 反之, 应用 Boltzman 函数进行回归分析。

(3) 在隧道的施工过程中, 应用模糊概率公式对隧道最大水平收敛位移时能够保持的稳定概率进行计算, 得出量测断面的稳定性概率为 100%。模糊概率公式能够方便、及时地将隧道施工中的稳定概率信息反馈于隧道主管工程师, 成功地对隧道实施了动态预测管理, 为鞋底坡双连拱隧道进行安全顺利施工提供了有力的保障。

参考文献:

- [1] 刘贵应, 王宇兴, 等. 高速公路双联拱隧道结构分析及施工工艺的优化[J]. 地质科技情报, 2003, 22(1):97 - 99.
- [2] 王 军, 夏才初, 朱合华, 等. 不对称连拱隧道现场监测与分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2):267 - 271.
- [3] 杨小礼, 李 亮, 刘宝琛. 偏压隧道结构稳定性评价的信息优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4):484 - 488.
- [4] 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, 2002:141 - 149.
- [5] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002:123 - 140.
- [6] 宁佐利. 隧道施工安全预测预报的探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
- [7] JTJ042—94, 公路隧道施工技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1995:191 - 192.