

基于监控量测数据的隧道失稳分析

赵卫, 韦猛, 刘俊, 舒振杰

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059)

摘要:利用监控量测数据,结合灰色理论建立隧道洞身位移变形系统。采用尖点突变分析方法,对开挖过程中初支结构的稳定性进行分析,建立隧道塌方预测模型。通过杜家山隧道发生的塌方事故与预测模型进行验证,得出塌方预测结果与实际情况相吻合;说明建立的隧道塌方预测模型是有效的,可以用来指导该类隧道的施工。

关键词:隧道塌方;监控量测;灰色理论;尖点突变

中图分类号:U451+.2 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2012)03-0082-03

Analysis on Tunnel Instability Based on Monitoring Measured Data/ZHAO Wei, WEI Meng, LIU Jun, SHU Zhen-jie
(Environment and Civil Engineering Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: Based on the monitoring measured data and combined with grey theory, tunnel hole body displacement deformation system was established. The analysis was made on the stability of temporary supporting structure for excavation with cusp catastrophe method to build prediction model of tunnel collapse. The practical case of collapsing accident in Dujiashan tunnel showed the same result with that of prediction.

Key words: tunnel collapse; monitoring measure; grey theory; cusp catastrophe

0 引言

随着新一轮“西部大开发”的实施,诸多穿越西部山区断裂破碎带的长大隧道项目已在拟建或在建中。由于地质条件的不确定性等自然、人为因素的影响,使得地下工程在建设过程中地质灾害频发。山岭隧道建设过程中,塌方是最为常见的工程灾害,约占隧道内重大地质灾害出现概率的90%以上^[1]。

有关隧道塌方预测的分析,国内外许多学者已展开了多方面的研究。王迎超等(2010)^[1]结合灰色理论和协同学理论,基于监测数据,对隧道洞口松散围岩进行了塌方预测研究;刘春(2008)^[2]结合现场拱顶下沉实测数据,利用突变理论,建立了隧道开挖围岩失稳的尖点突变模型;石杰红(2009)^[3]采用熵突变准则选取分析了围岩稳定性,并与数值模拟计算结果相比较;使突变理论在隧道塌方机制分析方面得到了较好应用,取得了许多可喜的研究成果。本文利用灰色理论对隧道洞身施工过程中的围岩进行塌方预测研究,分析发生塌方的成因及可能性。

1 灰色理论

灰色系统理论是我国的著名学者邓聚龙教授1982年创立的一门新兴学科^[4]。灰色系统理论是一种研究少数据、贫信息、不确定性问题的新方法。

是研究系统分析、建模、预测、决策和控制的理论。

灰色预测就是利用灰色过程中所显示现象既是随机的、杂乱无章的,也是有序的、有界的这一潜在规律,建立灰色模型对系统进行分析预测。灰色预测通常是指对在一定方位内变化的、与时间有关的灰色过程的预测。最常用的是灰色系统关联分析法和灰色局势决策方法。隧道工程影响因素较多,其周围环境、工程地质条件和施工条件等是模糊的、不确定的,所获得的信息也是有限的,具有灰色系统的特点,非常适合灰色理论的应用条件。因此隧道中的塌方问题是一个灰色系统,可以利用灰色系统关联分析法展开研究。

2 塌方灰色预测模型建立

2.1 灰色生成

灰色系统中将原始数据列 $\{x^{(0)}\}$ 中的数据按照某种要求进行处理,则称为生成^[5]。在隧道洞身位移量测数据中,往往是非规律性的(即时间间隔不同),因此利用这些数据建模时,要先对实测数据进行规律化处理。设原始数据序列为 $x^{(0)}(i), i=1, 2, 3, m, \dots, n$ 。其中 n 为测点数。数据序列为等时间间隔取样,做一次累加生成数列记为:

$$x^{(0)}(i) = \sum_{k=1}^i x^{(0)}(m)$$

收稿日期:2011-08-19

作者简介:赵卫(1987-),男(汉族),山东泰安人,成都理工大学硕士研究生,防灾减灾工程及防护工程专业,研究方向为隧道工程、岩土工程及地质工程,四川省成都市成华区二仙桥东三路一号, zw_cdut@126.com。

2.2 模型的建立

(1) 累加数列, 设隧道洞身位移变形的数列为 $\{x_i^{(0)}\}$, 对其做一次对应的累加数列 $\{x_i^{(1)}\}$ 。其中:

$$x_i^{(1)}(m) = \sum_{k=1}^m x_i^{(0)}(k) \quad (1)$$

(2) 建立差分微分方程 GM(1,1) 预测模型, 建立微分方程为:

$$dX^{(1)}/dt + ax^{(1)} = u \quad (2)$$

该方程即为 GM(1,1) 模型。式(2)中:

$$\hat{\alpha} = (\alpha, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (3)$$

$$Y_N = [X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(N)]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(1)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(3) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ & M \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(N) + X^{(1)}(N-1)] & 1 \end{bmatrix}$$

求出 $\hat{\alpha}$ 后解方程(2)得:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = [(X^{(0)}(1) - u/a)e^{-at} + u/a] \quad (4)$$

对式(4)求导可得其还原解, 即:

$$X^{(0)}(k+1) = -a(X^{(0)}(1) - u/a)e^{-ak} \quad (5)$$

(3) 灰色模型的精度检验。在选定模型之后, 要经过检验才能判定其是否合理, 只有经过检验的模型才可以用作预测, 指导后续施工^[5]。灰色模型的精度检验一般有 3 种方法: 残差大小检验法、关联度检验法和后验差检验法。

(4) 隧道围岩发生塌方的失稳模型。突变理论是法国数学家 Thom 于 1972 年创立的, 它以拓扑学、奇点理论和结构稳定性等数学工具为基础, 用来研究不连续现象, 特别适用于描述用力或动力的渐变导致状态突变的现象^[8]。由于地下工程的复杂性, 可以用突变理论研究隧道塌方问题。根据尖变模型理论, 将系统的还原解形式通过泰勒级数展开式转换为具有尖点突变形式的方程表示:

$$\Psi = x^4 + vx^2 + wx$$

则其一次导数表示为:

$$d\Psi/dx = 4x^3 + 2vx + w = 0 \quad (6)$$

即为模型系统的模拟方程。其判别式: $\Delta = 4v^3 + 27w^2$ 。由尖点突变理论的分叉集(如图 1)得知, 当 $\Delta = 0$ 时, 系统处于不稳定状态, 而当 $\Delta < 0$ 时, 系统也有可能失稳。判断不稳定点的方法是: $d^2\Psi/dx = 6x^2 + v < 0$ 。

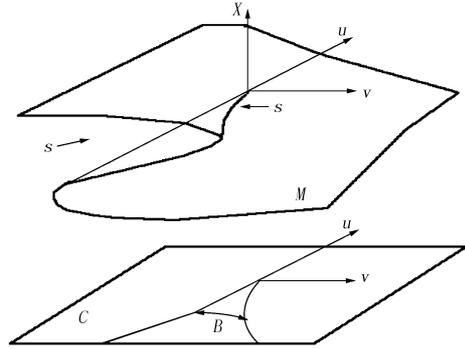


图 1 尖变曲面和分叉集

由上得知, 隧道失稳而生成塌方有 2 种情况:

- (1) $\Delta = 0$; (2) $\Delta < 0$ 且 $6x^2 + v < 0$ 。

3 工程实例

3.1 工程概述

杜家山隧道位于广元市青川县境内, 右洞全长 1886 m, 最大埋深 220 m。

隧址区地处四川盆地西北缘龙门山脉北端, 为中等切割的构造剥蚀型低山窄谷地貌。主要为第四系粉质粘土、碎石土及黄坪组强风化绢云千枚岩、砂质千枚岩、 F_{d1} 和 F_{d2} 龙门山断裂带组成。土体结构松散, 厚度较大。绢云千枚岩劈理发育, 劈理面倾角陡, 层间结合差, 裂隙发育; 受区域构造影响, 该段岩体多呈裂隙块状结构; 岩石质软, 遇水软化及层间脱落。

3.2 预测模型分析

首先, 根据 K15 + 544 施工段监控量测得到的位移数据(见表 1), 建立原始数据序列。

表 1 K15 + 544 段监控量测位移数据

编号	监测日期	水平收敛/mm	拱顶下沉/mm
1	2011-05-08	12	13
2	2011-05-09	8	12
3	2011-05-10	13	13
4	2011-05-11	7	10
5	2011-05-12	10	7
6	2011-05-13	9	8
7	2011-05-14	12	10
8	2011-05-15	9	6
9	2011-05-16	8	9
10	2011-05-17	16	6

然后根据数据建立模型, 由 $X^{(0)}(i) = X(i), i = 1, 2, 3, \dots, 10$ 生成累积序列 $X^{(1)}(i), i = 1, 2, \dots, 9$ 。

其次, 由 $\hat{\alpha} = (\alpha, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$ 得:

$$\hat{\alpha} = \begin{bmatrix} -0.024 \\ 8.85 \end{bmatrix}$$

即: $a = -0.023, u = 8.85$ 。

最后得出预测模型:

$$X^{(1)}(k+1) = 368.7e^{0.024k} - 357.5 \quad (7)$$

3.3 精度检验

采用关联度检验的方法对预测模型的精度检验:

计算得:

$r = (1/10)(1 + 0.85 + 0.76 + 0.97 + 0.68 + 0.89 + 0.8 + 0.86 + 0.95 + 1) = 0.876 > 0.6$, 满足精度要求, 所以关联度检验通过。

3.4 尖点突变分析

将公式(7)的还原解展开成泰勒级数的形式, 并对其进行 Tschirnhaus 变换, 即令 $t = T - Z$, 即可化为尖点突变模型势函数标准形式^[8]并判断其判别式。根据其判别式 $\Delta = 4v^3 + 27w^2$ 的符号即可判断隧道围岩是否处于不稳定状态。

求得: $v = -0.9, w = 0.038; \Delta = -2.88 < 0$ 。

则证明此处围岩是不稳定的。分析原因知: 杜家山隧道处于强震区断裂破碎带的中心断裂——龙门山断裂带。

而且根据现场观察知: K15 + 544 段位于 F₄₂ 断裂破碎带, 破碎带物质组成为构造片岩、绢云千枚岩、断层角砾, 局部夹断层泥, 岩体呈碎裂状及散体状结构。本阶段隧道于 2011 年 5 月 10 日开始施工, 在开挖过程中左侧围岩岩体松散、破碎, 掌子面明显渗水, 拱腰局部呈线状水和股状水, 围岩整体稳定性极差。开挖完成准备初喷时左侧拱腰不断掉块, 最后形成一个深约 4.5 m, 长宽各 1.5 m 左右的塌腔, 塌腔内不断地掉块, 且有一股较大的水流顺着

塌腔流出, 伴有淤泥状的洞渣。2011 年 5 月 17 日在施工下道坑过程中, 在拱脚位置突然出现涌水(瞬时涌水量约 12 m³/h)并有松散洞渣与水一起涌出, 同时初支表面出现裂缝, 左侧拱腰钢架发生突变, 且初支变形侵蚀二衬界限, 已威胁施工安全。

因此上文中提出的利用监测数据建立的预测模型与实际情况相符, 可以用来判断施工过程中复杂地形的围岩稳定性预测。

4 结语

我国西部许多地区处于强震区断裂带上, 随着大规模山岭隧道的建设, 进一步深入开展震区断裂带围岩稳定性的研究, 对确保隧道工程施工安全与稳定具有十分重要的意义。通过预测模型的分析预测, 提高了施工的安全性。

利用新奥法施工技术中的必不可少的重要环节——监控量测, 本文建立的灰色尖点突变预测模型, 是可靠的、实际的, 具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 王迎超. 山岭隧道塌方机制及防灾方法[D]. 浙江杭州: 浙江大学, 2010.
- [2] 刘春. 深埋隧道围岩突变失稳风险预测[J]. 中国矿业, 2008, (3).
- [3] 石杰红, 等. 数值模拟与熵突变综合分析边坡下地下工程围岩稳定性[J]. 金属矿山, 2009, (3).
- [4] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 湖北武汉: 华中工业大学出版社, 1992.
- [5] 沈海超, 程远方, 王京印, 等. 基于实测数据及数值模拟断层对地应力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3985-3990.

(上接第 71 页)

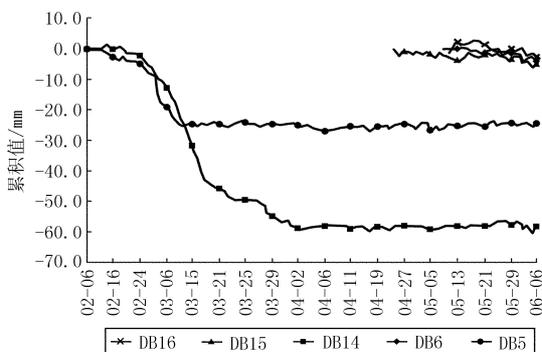


图 6 地表沉降测点时程变化曲线图

(2) 从实测数据统计分析看, 大部分测点沉降值在 30 mm 以内, 与计算模型基本吻合, 只有基坑南侧 DB14 测点沉降值较大, 为 59.2 mm。主要原

因为施工过程中土钉墙坡脚涌水、涌沙, 导致上方地表发生沉降。

参考文献:

- [1] JGJ 8-2007, 建筑变形测量规范[S].
- [2] 陆健. 基坑开挖引起地表变形的原因分析[J]. 科技信息, 2009, (36).
- [3] 于来法. 地下铁道建设的第三方环境变形监测[J]. 测绘通报, 2004, (11).
- [4] 李小青, 王朋团, 张剑. 软土基坑周围地表沉降变形计算分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(9).
- [5] 谢伟文, 方门福. 深圳地铁第三方变形监测的技术方法[J]. 城市勘测, 2007, (3).
- [6] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4).