

基于突变理论的山岭隧道塌方风险预测

胡长明¹, 贡少瑞², 张超晖³, 张礼奎³, 张雪晶³

(1.西安建筑科技大学土木工程学院 陕西西安 710055; 2.金地集团西北区域公司 陕西西安 710075; 3.陕西煤业化工建设(集团)有限公司, 陕西西安 710021)

摘要: 为建立隧道施工穿越冲沟段塌方风险的预测模型, 统计分析了 200 例隧道塌方事故, 总结出影响隧道塌方的 11 大风险因素, 将各因素归纳为工程地质、水文地质、勘察设计施工等三大指标, 并对其进行分解, 建立山岭隧道的塌方风险评价体系, 利用突变理论对隧道塌方风险进行风险评估. 应用该模型对某隧道施工穿越冲沟地段进行塌方风险预测, 结果能较好反映该工程实际情况, 研究成果能够为类似隧道工程塌方风险管理提供依据.

关键词: 安全管理工程; 隧道塌方; 突变理论; 风险预测

中图分类号: TU745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2014)01-0010-06

随着我国交通事业的蓬勃发展, 隧道建设规模越来越大, 施工过程中围岩稳定性问题也越显突出, 塌方事故时有发生, 已成为造成经济损失、工期延误等的重要原因, 因此对隧道的稳定性问题进行风险评估和预测势在必行^[1-2].

目前研究隧道围岩稳定性的方法主要有灰色优化理论^[3]、模糊数学^[4-5]、人工神经网络^[6]、支持向量机^[7]等, 这些方法在围岩稳定性分级中取得了许多成果, 但还存在一些不足: 灰色理论的准确性和简捷性不够; 模糊理论存在着隶属度、权重难以确定等缺陷; 神经网络方法在学习样本数量有限时, 精度难以保证, 当学习样本数量很多时, 泛化性能不高. 因此, 对隧道围岩稳定性评价有待进一步研究.

山岭隧道工程施工过程中, 致塌因素众多, 机制复杂, 很难建立统一的风险评估模型, 再加上基础资料缺乏, 要对隧道工程尤其是山岭隧道穿越特殊不良地质情况下施工塌方风险进行定量评估难度非常大^[8-9].

突变级数法^[10]是在突变理论基础上发展起来的一种综合评价方法. 该方法考虑了各评价指标的相对重要性, 定性和定量相结合, 减少了主观性又不失科学性、合理性, 而且计算简易准确^[11]. 本文基于突变级数法, 建立了山岭隧道塌方风险综合评价分析模型, 对塌方下穿特殊地段施工塌方风险进行预测评价, 结合现场监控数据, 验证该方法在塌方风险预测的可行性.

1 突变理论评价法的基本原理及理及步骤

1.1 基本原理

所谓突变是指从一种稳定状态跳跃式地转变到另一种稳定状态, 即在某一系统临界点附近, 控制参数的微小改变可以从根本上改变系统的结构和功能性质的现象. 它根据势函数把临界点进行分类, 用势函数的存在与消失判断事物的稳定性与不稳定性, 通过建立数学模型演绎质量互变过程, 从而可以更科学更准确地认识不连续现象的机理, 并作出评估预测. 实际上, 隧道的塌方失稳也是一种突发破坏现象, 具有明显的非线性和不连续性, 闫长斌^[12]、刘学增^[13]等学者运用了突变理论解释探讨过隧道塌方失稳的机理, 本文从隧道塌方风险的角度进行预测评估.

1.2 评价步骤

(1) 评价指标确立.

对评价对象进行多层次分解, 当分解到对某个子指标可以量化时, 分解就可以终止.

(2) 确定突变模型.

收稿日期: 2013-05-29

修改稿日期: 2014-02-18

基金项目: 住房和城乡建设部 2012 年科学技术项目计划——软科学研究项目(建设项目管理)(2012-R3-17); 包头市科技计划项目(2011x1006; 2012x1002)

作者简介: 胡长明(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程造价与管理方向的研究. hu.tm@163.com

运用突变理论进行评价一般涉及四种初等模型, 见表 1. 各式中 $f(x)$ 表示系统的状态变量 x 的势函数, 状态变量 x 的系数 u 、 v 、 w 、 t 表

表 1 初等突变模型				
Tab.2 catastrophe theory model				
模型	控制变量	状态变量数	势函数标准形式 $f(x)$	平衡曲线 $f'(x)$
折叠突变模型	1	1	x^3+ux	$3x+u$
尖点突变模型	2	1	x^4+ux^2+vx	$4x^3+2ux+v$
燕尾突变模型	3	1	$x^5+ux^3+vx^2+wx$	$5x^4+3ux^2+2vx+w$
蝴蝶突变模型	4	1	$X^6+ux^4+vx^3+wx^2+tx$	$6x^5+4ux^3+3vx^2+2wx+t$

示该状态变量的控制变量. 当一个评价目标被分解为一个、两个、三个、四个指标时, 分别运用折叠突变模型、尖点突变模型、燕尾突变模型、蝴蝶突变模型来计算评价目标值^[14].

(3) 导出归一公式. 归一公式将系统内部各控制变量不同的质态归化为可比较的同一种质态, 从而对系统进行量化递归运算, 求出表征系统状态特征的系统总突变隶属函数值, 作为综合评价的依据. 通过推导, 四种常见模型的归一公式^[15]如下:

- 折叠突变模型归一公式为: $x_u = u^{1/2}$
- 尖点突变模型归一公式为: $x_u = u^{1/2}$, $x_v = v^{1/3}$
- 燕尾突变模型归一公式为: $x_u = u^{1/2}$, $x_v = v^{1/3}$, $x_w = w^{1/4}$
- 蝴蝶突变模型归一公式为: $x_u = u^{1/2}$, $x_v = v^{1/3}$, $x_w = w^{1/4}$, $x_t = t^{1/4}$

(4) 评价的原则. 为满足突变模型中分歧方程的要求, 必须遵循以下原则. 如果系统的各个控制变量间不能相互弥补, 则要从各个控制变量对应的 x 值中选取最小的一个作为整个系统的 x 值, 即为“非互补”原则; 如果系统的各个控制变量之间可以相互补充, 以使 x 值达到较高的平均值, 则取各个控制变量对应的 x 值的平均值, 即为“互补”原则; 如果各个控制变量必须达到某一阈值后才能互补, 即为“过阈互补”原则.

2 突变级数在隧道塌方风险预测中的应用

2.1 隧道塌方事故统计与影响因素分析

为了总结隧道施工中引起塌方的各种原因, 本文搜集了 200 例隧道塌方案例, 总结出 4 大类 10 种隧道塌方事故的原因, 包括塌方段的岩体结构类型复杂、围岩条件差、结构偏压严重、不良地质种类多、地下水复杂、地表水量大、降水量大、设计不合理、施工水平低、地质勘察不准确等^[16]. 隧道塌方分类、成因、次数及所占比例见表 2.

2.2 基于突变级数法的隧道塌方风险评价体系

2.2.1 指标体系的建立

由统计结果来看, 影响隧道塌方的主要原因有 4 大类共 11 种, 为了更好地建立塌方风险评价体系, 因其它方面塌方成因不能准确分解,

表 2 隧道塌方原因、次数及所占比例			
Tab.2 Classification, causes, number and, proportion of the tunnel collapse			
分类	塌方成因	统计次数	比例/%
工程地质	岩体结构复杂	35	17.5
	围岩条件差	36	18
	结构偏压严重	8	4
	不良地质种类多	15	7.5
水文地质	地下水复杂	19	9.5
	地表水复杂	5	2.5
	降水量大	12	6
勘察设计施工	设计不合理	29	14.5
	施工水平低	29	14.5
	地质勘察不准确	6	3
其它方面	其它成因	6	3

故建立隧道塌方风险评价体系仅包括工程地质方面 B_1 、勘察设计施工方面 B_2 、水文地质方面 B_3 等 3 方面. 对 3 大指标体系进行可量化分解, 采用专家打分法最终确定各指标重要性, 按照重要指标在前, 次要指标在后排, 结果见表 3. 可知第 1 指标隧道塌方风险评估为总评价指标, 第 2 级分目标层指标为燕尾突变型, 第 3 级指标是一个蝴蝶突变型及两个燕尾突变型.

表 3 隧道塌方风险评价体系表
Tab.3 Evaluation Indexes of the Caving Risk

总目标层	分目标层	指标层	影响因素
隧道塌方风险评估 (A)	工程地质方面 (B ₁)	围岩条件 (C ₁)	围岩强度
			围岩应力
			围岩节理情况
		岩体结构类型 (C ₂)	间距
			延伸性
			粗糙度
		特殊不良地质 (C ₃)	风化程度
			不良地质类别
			不良地质出现频率
	勘察设计施工方面 (B ₂)	偏压 (C ₄)	偏压角度
			偏压段长度
		施工管理 (C ₅)	施工水平
			施工措施
			监控测量
			隧道开挖方式
		设计 (C ₆)	爆破扰动
			隧道埋深情况
			支护设计方式与质量
			开挖跨度
	水文地质方面 (B ₃)	地质勘察 (C ₇)	地质勘察准确性
		降水量 (C ₈)	降水频率
			每次降水量
		地下水 (C ₉)	地下水来源
			排水措施
		地表水 (C ₁₀)	防水措施
			地表水来源
			水量
			排水措施

2.2.2 评价分级标准的制定

常规的等级标准是将安全水平由低到高依次分为几乎不发生、很少发生、偶尔发生、可能发生及频繁发生等 5 个等级。一般情况下采用突变级数法算出的评价值较高，需对照绝对意义下的常规等级标准制定出适应自身特点的等级标准，这使得突变级数法更具有实用价值^[17]。根据归一公式化特点，分为五个等级如表 4 所示。

表 4 隧道塌方风险综合评价等级标准
Tab.4 Standard assessment level of the Caving Risk

等级	几乎不发生	很少发生	偶尔发生	可能发生	频繁发生
标准区间	[0.00,0.15]	[0.15,0.40]	[0.40,0.60]	[0.60,0.85]	[0.85,1.00]

3 隧道塌方综合评估

3.1 工程概况

某隧道属于剥蚀丘陵山地地貌，地形起伏较大，该隧道中线高程最大高差约 71 m，最大埋深 83 m。隧道左洞长 860 m，右洞长 900 m，采用分离式双洞布置。隧道左线 ZK196+980~ZK197+030 段位于冲沟地段，埋深平均 21 m，最小 4 m，围岩主要为碎石、强风化花岗岩，部分中风化花岗岩，碎石

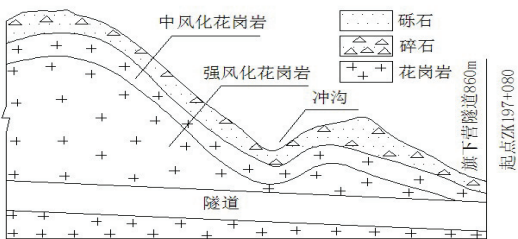


图 1 隧道左线冲沟地段地质纵断面图
Fig.1 Geological longitudinal profile of the tunnel left line gully area

结构松散, 强风化岩节理裂隙很发育, 岩体破碎, 含少量裂隙水. 地质勘察为 V 级围岩, 采用 CD 法施工, 隧道左线冲沟地段地质纵断面见图 1 所示.

3.2 确定评价指标评分值

根据隧道 ZK196+980~ZK197+030 段基本情况, 按照表 3 建立的评价指标体系, 对其第三级指标进行评分, 给定的评分取平均值. 由于指标间可替代性较小, 故采用“非互补”原则, 经无量纲化处理最终得到二级隶属度、总隶属度及评价结果.

根据突变级数法算出的隧道塌方评价值, 以此来预测塌方的可能性. 其中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 、 C_8 、 C_9 、 C_{10} 参数取值及专家平均评分见表 5.

表 5 ZK196+980~ZK197+030 段隧道塌方风险因素参数及专家评分
Tab.5 ZK196+980-ZK197+030 section of tunnel collapse risk factors parameters

指标层	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
参数取值	V	破碎	常见	20°~30°	良好	良好	较准确	很少	少	很少
专家评分	0.821	0.763	0.579	0.567	0.315	0.232	0.173	0.143	0.122	0.11

分目标层工程地质原因 (B1) 有四个二级指标, 符合蝴蝶突变归一公式, 有:

$$x_{u1} = u^{1/2} = (0.821)^{1/2} = 0.9061 ; x_{v1} = v^{1/3} = (0.763)^{1/3} = 0.9139 ;$$

$$x_{w1} = w^{1/2} = (0.579)^{1/4} = 0.8723 ; x_{t1} = t^{1/5} = (0.567)^{1/5} = 0.8927 ;$$

按“非互补”原则, “大中取小”, 即: $x_1 = \min(x_{u1}, x_{v1}, x_{w1}, x_{t1}) = 0.8723$

同理求得 $x_2=0.5612$, $x_3=0.3782$ 二级指标共三个, 符合燕尾突变模型归一公式, 有:

$$x_u = u^{1/2} = (0.8723)^{1/2} = 0.934 ; x_v = v^{1/3} = (0.5612)^{1/3} = 0.8250 ;$$

$$x_w = w^{1/4} = (0.3782)^{1/4} = 0.7842$$

同样按“非互补”原则, “大中取小”, 即: $x = \min(x_u, x_v, x_w, x_t) = 0.7842$

3.3 评价结果

根据突变级数法算出隧道塌方评价值 $x=0.7842$, 参照表 4 隧道塌方风险综合评价等级标准, ZK196+980~ZK197+030 段塌方风险综合评价等级为可能发生, 塌方风险很大.

3.4 处理方案

(1) 掌子面停止继续掘进, 采用中空注浆系统锚杆与双排超前小导管联合组成周边围岩注浆支护与加固体系, 形成厚度不小于 3 m 的加固圈. 系统锚杆采用 $\Phi 25$ 中空注浆锚杆 $L=3$ m, 环向间距 0.5 m. 采用壁厚 3.5 mm 的 $\Phi 42$ 钢管作为超前小导管进行注浆, 要求奇数排外插角 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$, 偶数排外插角 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 环向间距为 40 cm, 布设于上台阶断面 90° 区域.

(2) 先浇筑钢筋混凝土挡土墙, 待强度满足要求后进行碎石土夯实分层回填, 确保洞顶覆土厚度不小于 3 m; 对回填区进行注浆加固, 将小导管打入原地表不小于 50 cm, 且部分外露 20 cm 于回填土面层; 在冲沟处地表打设 $\Phi 50\times 5$ mm 小导管, 1×1 m 梅花形布置, 注浆液水灰比为 0.5~1, 注浆压力为 0.5~1 MPa; 为确保注浆效果, 可在注浆前先在回填土面层上浇筑 15 cm 厚 C20 混凝土, 注浆完成后再继续浇筑 15 cm 厚 C20 混凝土封闭注浆管, 形成保护壳. 见图 2 冲沟段处理断面示意图.

3.5 监控测量

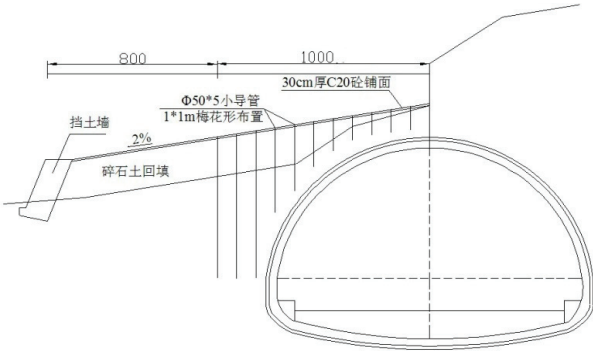


图 2 冲沟段处理断面示意图
Fig.2 Schematic diagram of the gully area

2012年3月18日,在离上台阶掌子面1 m ZK197+010断面处理设左、中、右3个拱顶沉降观测点,图从3月18日到4月7日的三点沉降累计值。由图3可知,在3月21日掌子面开挖时,三测点沉降量变化比较大,连续2天变化超过预警值5 mm/d。3月23日经加固处理,测点沉降量明显减小,并趋于稳定。在4月2日下台阶开挖时,三测点约有变化,但幅度不大,表明经加固后围岩基本稳定。

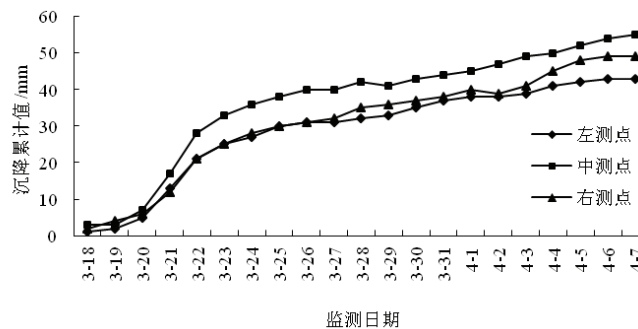


图3 拱顶各测点沉降累计值图

Fig.3 Accumulated value of the settlement of each vault point

4 结论与建议

通过以上分析和研究,可以得到如下结论:

(1) 通过收集隧道塌方资料,总结出岩体结构类型复杂、围岩条件差、结构偏压严重、不良地质种类多、地下水复杂、地表水量大、降水量大、设计不合理、施工水平低、地质勘察不准确及其它方面等塌方成因,并归纳为工程地质方面、勘察设计施工方面、水文地质方面3大指标。根据突变级数的基本理论,对指标体系进行分解,建立了山岭隧道塌方风险综合评价分析模型,把定性的问题转化成定量的问题加以研究分析,从而减少主观性,使分析评判更趋于客观。

(2) 本文建立了的山岭隧道施工穿越冲沟地段塌方分析的突变模型,应用该模型对某隧道工程进行塌方风险预测,通过现场监测数据的验证,表明其结果能较好反映该工程实际情况,能够为类似隧道工程塌方风险管理提供依据,并有广泛的应用前景。不过模型的精确与否很大程度取决于参数值,因此,如何准确地选取这些参数是解决工程实际问题的关键。

参考文献 References

- [1] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下工程与工程学报, 2006, 2(1):13-20.
HUANG Hongwei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13-20.
- [2] 毛 儒. 隧道工程风险评估[J]. 隧道建设, 2003, 13(2): 37-40.
MAO Ru. The risk assessment of tunnel engineering[J]. Tunnel Construction, 2003, 13(2): 37-40.
- [3] 冯玉国. 灰色优化理论模型在地下工程围岩稳定性分类中的应用[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 62-66.
FENG Yugun. Application of grey optimal theory model the stability classification of adjoining rock of underground construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 62-66.
- [4] 陈洁金, 周峰, 阳军生, 等. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8):2365-2369.
CHEN Jiejing, ZHOU Feng, YANG Junsheng. Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2365-2369.
- [5] 许传华, 任青文. 地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1852-1855.
XU Chuanhua, REN Qingwen. Fuzzy-synthetic evaluation on stability of surrounding rockmasses of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1852-1855.
- [6] 蔡广奎. 围岩稳定性分类的BP网络模型的研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
CAI Guangkui. Research of BP Network Model of Classification of Surrounding Rock Stability[D]. Nanjing: Hohai University, 2001.
- [7] 赖永标, 乔春生, 刘开云, 等. 支持向量机在围岩稳定性分类中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1092-1096.
LAI Yongbiao, QIAO Chunsheng, Liu Kaiyun et al. Application of support vector machine in classification of surrounding rock stability[J]. SHUILI XUEBAO, 2006, 37(9): 1092-1096.
- [8] 王迎超. 山岭隧道塌方机制及防灾方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 787-792.
WANG Yingchao. Collapse mechanism and preventive measures of mountain tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 787-792.

- [9] 李孜军, 石东平. 基于粗糙集-模糊评判-神经网络的隧道施工安全状态评估[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(6): 231-235.
LI Zijun, SHI Dongping. Renovated security status evaluation system for tunnel construction based on the rough setsfuzzy evaluation-neural network[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 11(6): 231-235.
- [10] 凌夏华. 突变理论及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
LING Xiahua. Mutation theory and its application[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1987.
- [11] 黄奕龙. 突变级数法在水资源持续利用评价中的应用[J]. 干旱环境监测, 2001, 15(3): 167-170.
HUANG Yilong. Application of catastrophe Progression Method to Evaluation of Sustainable Usage of Water Resource[J]. Arid Environmental Monitoring, 2001, 15(3): 167-170.
- [12] 闫长斌, 徐国元. 基于突变理论深埋硬岩隧道的失稳分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 508-512.
YAN Changbin, XU Guoyuan. Instability analysis of deep-buried tunnels with catastrophe theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(4): 508-512.
- [13] 刘学增, 朱保华, 翟德元. 深部隧道失稳的尖点灾变模型[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2000, 19(1): 38-40.
LIU Xuezeng, ZHU Baohua, ZHAI Deyuan. The cusp catastrophe model for destabilization of deep tunnels. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2000, 19(1): 38-40.
- [14] 李江腾, 曹平. 硬岩矿柱纵向劈裂失稳灾变理论分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 371-375.
LI Jiangteng, CAO Ping. Analysis of pillar stability in hard rock mass by longitudinal splitting based on catastrophe theory[J]. Journal of Central South Science and University Technology: Natural Science Edition, 2006, 37(2): 371-375.
- [15] 洪亮, 王会萍. 基于突变理论的煤矿突发事件应急管理评价[J]. 煤炭安全, 2009, 11(2): 111-113.
HONG Liang, WANG Huiping. Standard Assessment for Emergency Management of Coal mine Accident Based on Mutation Theory[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 11(2): 111-113.
- [16] 胡长明, 贡少瑞, 梅源, 等. 山岭隧道穿越冲沟段塌方风险预测与分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 235-239.
HU Changming, GONG Shaorui, MEI Yuan, et al. Collapse risk forecast and analysis of cross-mountainous tunnel construction via gully sections[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 13(3): 235-239.
- [17] 李晓娟. 城市综合承灾能力评价研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 44(5): 489-494.
LI Xiaojuan. Study on assessment of urban composite disaster-bearing capacity[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2012, 44(5): 489-494.

Caving risk forecast of mountain tunnel construction based on catastrophe theory

HU Changming¹, GONG Shaorui², ZHANG Chaohui³, ZHANG Likui³, ZHANG Xuejing³

(1. School of Civil Engineering Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. Northwest Companies of Gemdale Group, Xi'an 710075, China; 3. Shaanxi Coal & Chemical Industry Construction (Group) Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: To analyze the research in tunnel engineering at home and abroad, and summarize the research status and development prospects, 200 cases of the tunnel caving are analyzed according to the statistical data, which can be divided into four major categories, consisting of 11 kinds of factors in engineering geology, hydrogeology, and the construction about survey and design. In decomposing each of these, mountain tunnel collapse risk assessment system was established, and tunnel collapse risk was evaluated by using the Catastrophe Theory. This means that the model can be used to predict the caving risk for the tunnel project and the results can reflect the actual situation, and the research results can provide the foundation for the engineering caving risk management of the similar tunnels and offer the significant guiding for the safety management of the construction as well.

Key words: tunnel caving; catastrophe theory; risk prediction; risk evaluation; engineering geology

(本文编辑: 吴海西)