Civil Engineering and Technology
December 2014, Volume 3, Issue 4, PP.52-57

Risk Analysis and Safety Assessment of Tunnel Geologic Hazard in Karst Areas

Ke Wu [1], Weimin Yang [1], Ke Zhang [2], Zhengyin Liu [2], Chengjun Wang [2]

1. Geotechnical and Structural Engineering Research Institute, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institue, Jinan, Shandong 250031, China

#Email: wk4223@163.com

Abstract

In order to find out the problems of tunnel geological hazard in karst areas during the construction, each risk sources which were influencing the safety of tunnel construction in karst region were relatively comprehensive analyzed based on the typical karst tunnel project of Daguangnan highway in Hubei province. And it carried out the qualitative risk analysis of tunnel geologic hazards. Then, one hierarchical structure model was established to give the relative weights of safety to each risk sources during the tunnel construction in karst region. Furthermore, the multilevel comprehensive safety assessment was carried out based on the fuzzy comprehensive evaluation method. Through the risk analysis and safety assessment of tunnel geologic hazard in karst areas, it is great significance for the correct evaluation of tunnel surrounding rock stability and construction safety.

Keywords: Tunnel; Karst; Risk Analysis; Safety Assessment; Geologic Hazard

岩溶地区隧道地质灾害风险分析与安全评估*

武科 [1]，杨为民 [1]，张珂 [2]，刘正银 [2]，王成军 [2]

1. 山东大学岩土与结构工程研究中心，山东 济南 250061

2. 山东省交通规划设计院，山东 济南 250031

摘　要：针对岩溶区隧道施工期遇到的地质灾害问题，以湖北省大广南高速公路典型岩溶隧道项目为依托，相对全面地分析了影响岩溶地区隧道施工安全的各个风险源，开展岩溶地区隧道地质灾害进行定性的风险分析；进而建立层次结构模型，给出各个风险源对岩溶地区隧道施工安全的相对权重。进一步，基于模糊综合评判法，进行多层次综合安全评估。通过岩溶地区隧道地质灾害风险分析与安全评估的研究和探索，对正确评价隧道围岩稳定与施工安全具有十分重要的意义。

关键词：隧道；岩溶；风险分析；安全评估；地质灾害

引言

高风险岩溶地区隧道建设常遇到地质原因诱发的工程灾害，且范围广，灾害性大。与此同时，工程地质灾害本身也是一个极其复杂的体系，其中的风险源更为繁杂。为了能及时准确地发现隧道施工期间的地质灾害风险源，将可能的风险消灭在萌芽之中，保证隧道建设的每一个环节都处于安全状态，开展岩溶地区隧道地质灾害风险分析与安全评估是非常有必要的。近年来专门性的地质灾害风险分析与安全评估研究虽然得到了较大的发展，但是针对隧道地质灾害风险分析与评估的研究相对缺乏。国外，国际隧道协会开展了隧道工程合同风险分担的研究；瑞典基于风险分析理论，开展了公路隧道决策研究。国内，针对重点隧道或大型地下工程，均开展了“可行性研究”，探讨了隧道灾害风险源，但缺乏与施工同步的深入探索[1-

*基金资助：国家自然科学基金项目(51308323)；山东省自然科学基金资助项目(ZR2011DQ008)；山东省交通科技项目(2011-26)

[5]。另外，风险分析与安全评估的理论和方法有很多种，如 GIS 法、人工神经网络法、物元模型综合评价等方法，各有优缺点[6-8]。综上分析，本文针对岩溶区隧道施工期遇到的地质灾害问题，以湖北省大广南高速公路典型岩溶隧道项目为依托，定义了影响岩溶地区隧道施工安全的各个风险源，开展了对岩溶地区隧道地质灾害进行定性的风险分析，给出各个风险源对岩溶地区隧道施工安全的相对权重；进一步，基于模糊综合评判法，进行多层次综合安全评估。

1 隧道地质灾害风险分析

隧道地质灾害的发生是由于人类活动造成原有地质环境改变而引起的，是一个多因素诱发的复杂体系。合理准确地确定和评价各个风险源的特征，对于抑制或避免隧道灾害的发生起着重要作用。根据隧道地质灾害特点和区域地质环境，建立风险源评价体系，不仅可以规避隧道工程设计与施工中可能遇到的潜在风险，而且可以为工程地质人员与建设者提供基础数据的调研与总结。

1.1 基本原则

针对岩溶地区隧道地质灾害的特点，将岩溶地区隧道地质灾害风险源划分为内在环境因素和外在诱发因素，其中内在环境因素包括地质构造特征、地形地貌、水文特征、岩土体力学特性等，外在诱发因素包括自然灾害与人为因素。为此，建立了以着重强调具体工程地质风险的分析体系，其不再将系统性和普适性作为构建风险分析体系的首要原则，一般考虑以下几点原则[9, 10]：

(1) 独立性原则。风险源具有针对性和代表性，尽量避免相互之间的重叠交叉。

(2) 可操作性原则。风险源的确定可以通过现场调研或试验直接获得。

(3) 精度适应性原则。风险源的确定在一定程度上，能够满足不同时期、不同工作状态下的精度需求。

(4) 重要性原则。隧道地质灾害风险因素非常多，本体系只考虑影响隧道安全的重要因素作为风险源。

(5) 客观性原则。

1.2 风险源分析

1.2.1 内在环境因素

岩溶地区隧道地质灾害风险的内在环境因素包括地质构造特征、地形地貌、水文特征、岩土体力学特性等。

(1) 地质构造特征

通过隧道区域地质构造风险源分析，了解区域内岩体已发生或正在发生的变形变位，掌握褶皱、节理、断层、劈理以及其他各种面状和线状构造岩土体。隧道开挖过程中，由于线路穿越地质构造复杂区域，致使原有断层、节理等破碎结构体迅速发展，围岩自稳能力不断降低，造成隧道失稳破坏。

(2) 地形地貌

以此探索影响控制地表水与地下水的运移途径和水动力条件。分水岭、洼地、沟壑等地形地貌极易贮存地表水，通过地表裂隙或渗透，弱化该区域围岩力学强度指标，对隧道稳定性产生极大影响。

(3) 水文特征

水文特征主要从地表水与地下水两个方面进行分析。其中，地表水为在不同地形地貌条件下的河流、冰川、湖泊或沼泽的发育情况和相互之间的关系；地下水为贮存在地层裂隙或溶洞中的水系，其危害性相对较大。

(4) 岩土体力学特性

不同的岩土体在不同的环境中，所具有的工程力学特性是完全不同的。黏土、份土、砂性土等软土体在动力水作用下会发生涌泥，极易引发重大工程事故。灰岩、页岩等岩石体根据其围岩等级，定义其工程

力学参数，评判围岩自稳能力。

1.2.2 外在诱发因素

(1) 自然灾害

隧道工程建设大多数都集中在山区地区，地震、强降雨等自然灾害极易诱发该区域山体滑坡、水灾、泥石流等发生，对隧道建设构成极大安全危害。

(2) 人为因素

初期地质勘察成果不精确、施工工艺不合理、支护措施不及时或准确、材料使用不当等人为因素造成隧道灾害风险。

1.3 风险等级评价

基于风险分析矩阵和岩溶地区隧道管理、设计与施工专业人员充分研讨的成果，将以上风险源等级进行了评价，如表 1、表 2 所示[11]。

表 1 风险分析矩阵

可能性	后果				
	1. 忽略不计	2. 小	3. 中	4. 大	5. 灾难性的
A(极可能)	M	S	H	H	H
B(很可能)	M	M	S	H	H
C(可能)	L	M	M	S	H
D(很少发生)	L	L	M	M	S
E(极少发生)	L	L	L	M	M

表 2 岩溶地区隧道地质灾害风险等级评价

序号	风险源	可能性	后果	风险等级
1	地质构造特征	A	4	H
2	地形地貌	C	3	M
3	水文特征	B	4	S
4	岩土体力学特性	C	3	M
5	自然灾害	E	2	L
6	人为因素	B	3	S

注：H-高风险；S-大风险；M-中风险；L-低风险

2 岩溶地区隧道建设安全评估

2.1 评价指标权重确定方法

基于层次分析法和模糊数学理论，结合风险源分析中不同因素之间的相互关系，建立递阶层次结构，以此确定指标层指标和准则层指标的权重。

2.2 安全评估模型

岩溶地区隧道地质灾害安全评估是一个涉及因素众多的评估体系，为此将评价隧道建设安全等级划分如下：第一层为目标，即隧道安全建设，用 A 表示；第二层为风险因素，包括内在环境因素和外在诱发因素，分别用 B_1、B_2 表示；第三层为风险源，分别用 C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6 表示。综上建立岩溶地区隧道安全评估的风险源集 $C=\{C_1, C_2,\ldots, C_6\}$。

与此同时，采用优、良、中、差四个等级来衡量隧道建设的安全状况，其集合为 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$；用安全、较安全、较不安全、不安全来表示隧道的安全程度。因此，$V=\{4\ 3\ 2\ 1\}$。

利用隶属函数建立风险源 C_i 对安全等级集合 V 的隶属向量为：

$$R_{Ci}=(r_{ci1}\ \ r_{ci2}\ \ r_{ci3}\ \ r_{ci4})\ \ (i=1,2,\ldots,n) \tag{1}$$

进而得到各单风险源评价矩阵 R'_{bi} 与其相应的权重向量 ω_{bi}，其中，

$$R_{bi}=\omega_{bi}\times R'_{bi} \tag{2}$$

则目标因素对评价集合的隶属向量：

$$Z=\omega_a\times(R_{b1}^T, R_{b2}^T,\cdots, R_{bm}^T)^T \tag{3}$$

从而给出隧道安全健康值 F，即：

$$F=\frac{4\times Z_1+3\times Z_2+2\times Z_3+1\times Z_4}{Z_1+Z_2+Z_3+Z_4} \tag{4}$$

表 3 岩溶地区隧道安全状态等级

等级	安全状态	健康值F
1	安全(围岩与支护结构无破损或存在轻微破损)	3.5＜F≤4.0
2	较安全(围岩与支护结构存在破坏)	2.5＜F≤3.5
3	较不安全(围岩与支护结构存在较严重破坏)	1.5＜F≤2.5
4	不安全(围岩与支护结构存在严重破坏)	1.0＜F≤1.5

3 应用实例

湖北省大广南高速公路紫荆山隧道穿越岩溶地区，为分离式隧道，最大埋深达 361.0m，全长 2337m。该地区为构造剥蚀-溶蚀低山丘陵地貌，属于鄂东南侵蚀-剥蚀山地余脉越岭地段，围岩主要为灰岩；坡面基岩大多裸露，岩溶较为发育，多为溶蚀洼地、溶洞、溶沟、溶槽、落水洞等，在 16.1km^2 范围内，有一定规模，较易识别的岩溶塌陷、天坑、暗河出口、漏斗等岩溶形态有 50 多处；隧道西北方向 2.5~3.0km 为王英水库，设计库容 63600 万立方米，常年蓄水水位 65.5m，隧道南西方向 5~6km 富水水库，常年蓄水水位 57.6m，两个水库可能通过各种通道与隧道连通，与隧道区岩溶水有着水动力联系。紫荆山隧道地质非常复杂，施工安全风险很大，隧道正常涌水量为 47794m^3/d，最大涌水量为 256159 m^3/d，隧道涌水灾害等级为最严重的 A 级。

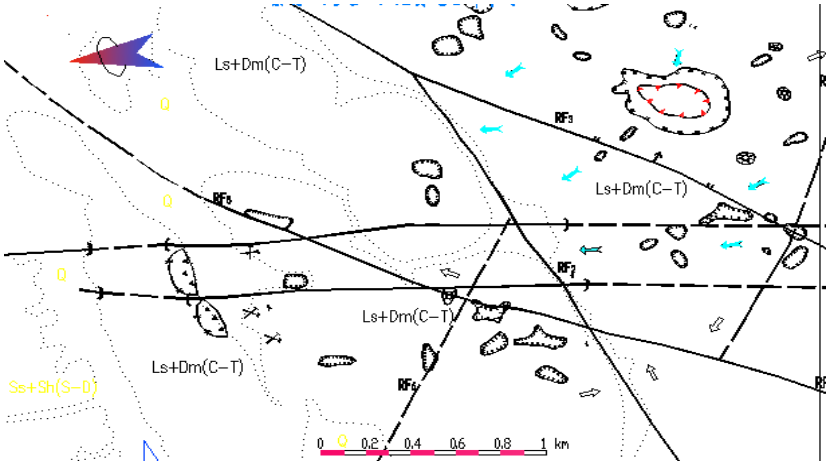

图1 隧道地质遥感图

图 1 给出了该隧道穿越区域的地质遥感图，结合地质分析和遥感扫描可知，左线 ZK221+700 或右线 YK221+760 附近发育一条压扭性断层 F2，断层走向 125°~210°，倾向东南，倾角 75°~85°，断裂带宽 3.5 米，可见 2cm 角砾状角砾岩，岩石破碎，断层面可见擦痕，为逆冲断层，断裂长度大于 3600m。该断层 F2 在紫荆山顶部与一低洼区域贯通，在雨季易形成漏斗，地表水顺断层渗透入山体的岩石中，弱化岩石的各项力学参数，成为该隧道建设的重大风险源。该隧道各项风险源等级划分与表 2 相同。

进一步，依据风险源与安全评估方法，对隧道建设开展了安全评估。聘请 10 名专家，分别对 6 个风险源评价分值，R_{c1}=(0.6 0.3 0.1 0)，R_{c2}=(0.3 0.3 0.2 0.2)，R_{c3}=(0.4 0.2 0.2 0.2)，R_{c4}=(0.2 0.3 0.3 0.2)，R_{c5}=(0.1 0.2 0.3 0.4)，R_{c6}=(0.4 0.3 0.2 0.1)，则

$$R'_{b1}=(R_{c1}\ R_{c2}\ R_{c3}\ R_{c4})^T=\begin{pmatrix}0.6 & 0.3 & 0.1 & 0\\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2\\ 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\end{pmatrix}$$

通过权重向量 ω_{b1} 和单因素评判矩阵 R'_{b1} 合成，可确定主体结构因素 B_i，对评语集合 V 的隶属向量 R_{b1}。

其中权重向量 ω_{b1} 通过乘积标度法算得：

$$\omega_{b1} = (0.193\ 0.353\ 0.193\ 0.261)$$

则

$$R_{b1} = (0.351\ 0.281\ 0.207\ 0.162)$$

同理可得 R_{b2}= (0.231 0.325 0.214 0.139)，R_{b3}= (0.186 0.411 0.319 0.078)，R_{b4}= (0.155 0.441 0.201 0.212)。进而得到

$$I_{b1}=R_{b1}\times V^{T}= (0.351\ 0.281\ 0.207\ 0.162)\times(4\ 3\ 2\ 1)^{T}=2.823$$

同理可得其它综合评价分值。进一步，求得岩溶地区隧道安全体系的综合评价值 I_a=2.746。由此可知，该隧道安全状态为良，安全程度接近于安全的水平。

4 结论

针对岩溶区隧道施工期遇到的地质灾害问题，以湖北省大广南高速公路典型岩溶隧道项目为依托，相对全面地分析了影响岩溶地区隧道施工安全的各个风险源，开展岩溶地区隧道地质灾害进行定性的风险分析与综合安全评估。

(1) 岩溶地区隧道地质灾害诱发因素很多，其中总结归纳的 6 个代表性风险源符合地质灾害特征，能够相对全面地分析地质灾害成因，评判风险等级。

(2) 安全评估方法能够相对准确地评判隧道建设安全状况，为工程设计者和建设者提供重要理论参考。

REFERENCES

[1] Carrara, F. Guzzetti, M. Cardinali, P. Reiehenbaeh. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard natural disaster[J]. Natural Hazards, 1999, 2:3-12.

[2] Van Westen, C. J., A. C. Seijmonsbeen, F. Mantovan. Comparing landslide hazard evaluation: three case support system for landslide hazard monitoring[J]. Natural Hazards, 1999, 20(2):57-69.

[3] WANG Chengliang. Study on the risk assessment methods of the geological disaster during the tunnel construction in karst areas on yiwan railway[D]. Beijing Jiaotong University, 2010. [王成亮. 宜万铁路岩溶区隧道施工地质灾害风险评价方法研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2010.]

[4] CHEN Jiejin, ZHOU Feng, YANG Junsheng, LIU Baochen. Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2365-2370.[陈洁金, 周峰, 阳军生, 刘宝琛. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8):2365-2370.]

[5] ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, SUI Bin, SHI Shaoshuai, ZHANG Qianqing. Causes of geological hazards and risk control of collapse in shallow tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5):164-171.[周宗青, 李术才, 李利平, 隋斌, 石少帅, 张乾青. 浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制[J]. 岩土力学, 2013, 34(5):164-171.]

[6] XU Zhenhao, LI Shucai, LI Liping. Riskassessment of water or mud inrush of karst tunnels basedon analytic hierarchy process[J]. Rock and Soi Mechanism, 2011, 32(6):1757-1765.[许振浩, 李术才, 李利平. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学, 2011, 32(6):1757-1765.]

[7] LI Liping, LI Shucai, CHEN Jun. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1345-1354.[李利平, 李术才, 陈军. 基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7):1345-1354.]

[8] KARWOWSKI W, MITAI A. Applications of approximate reasoning in risk analysis[C]. Applications of fuzzy set theory in human factors, New York:[s.n.], 1986.

[9] WU Yazi. Research on risk assessment of geological hazards in the highway of mountain area[D]. ChengDu University of Technology, 2005.[吴亚子. 山区公路地质灾害危险性评估方法研究.[D]. 成都:成都理工大学, 2005.]

[10] QI Hongliang. Research on assessment and countermeasures of geological hazards of highway roadbed[D]. Chang'an University, 2008.[齐洪亮. 公路路基地质灾害评价及防治对策研究[D]. 西安:长安大学, 2008.]

[11] XIONG Weibing, SHI Changli, ZHOU Xinquan. Geological hazard risk analysis of river-crossing shield tunneling in soft soil area [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009, 2:9-12.[熊卫兵,石长礼,周新权. 软土地区盾构越江隧道地质灾害风险分析[J]. 地下工程与隧道, 2009, 2:9-12.]

【作者简介】



[1] 武科（1978-），男，汉族，博士，副教授，硕士生导师，主要从事地下工程方面的教学与研究工作。

Email: wk4223@163.com

[2] 杨为民（1979-），男，汉族，博士，讲师，主要从事地下工程方面的教学与研究工作。