

基于监控量测的山岭隧道工程风险管理分析

胡元鑫¹, 刘新荣¹, 李晓红², 张丽娟³, 王道良¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;
3. 合肥铁路勘察设计院有限责任公司, 安徽 合肥 230011)

摘 要: 风险的概念已贯穿于整个社会, 具有典型的时空差异性。山岭隧道工程是一高风险工程, 主要原因在于其涉及的不确定性因素较多, 表现为地质环境复杂、基础信息不充分、施工技术复杂等方面。风险管理和控制是削减山岭隧道工程风险的有效手段, 可于工程建设各阶段实施。其中施工阶段的残余风险可利用监控量测进行管理和控制。以浙江黄衢南高速公路璜田隧道为例, 根据不良事件发生可能性和潜在破坏程度建立了以该隧道风险管理矩阵、基于监控量测数据的风险日报表及预警系统为主体的风险管理框架。经璜田隧道出口端右线 YK17+660 断面拱顶沉降数据和现场调查验证, 所建立的风险管理框架能有效地控制该隧道的建设阶段风险, 可为类似工程的风险管理和控制提供思路。并认为山岭隧道工程风险接受准则的建立应基于隧道围岩变形容许极限及其响应时间。

关键词: 山岭隧道工程; 不确定性因素; 高风险; 风险管理; 监控量测

中图分类号: TU94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)07-1135-07

作者简介: 胡元鑫(1976-), 男, 重庆人, 博士研究生, 从事工程地质与岩石力学研究。Email: huanduh@gmail.com。

Engineering risk management of mountain tunnels based on observation

HU Yuan-xin¹, LIU Xin-rong¹, LI Xiao-hong², ZHANG Li-juan³, WANG Dao-liang¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Hazard Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Hefei Railway Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: The concept of risk crosses through the society with significance and value that differ greatly in space and time. Mountain tunnel engineering has high risk because of plenty of uncertainties in many of areas related to ground conditions. The uncertainties have characteristics such as complicated geology environment, insufficient basic data and multiple construction methods. Risk management and control, which is effective to reduce risk of mountain tunnel engineering, can be implemented during the construction of mountain tunnel engineering. The residual risk management and control of construction phase can be solved with observation. The case of Huangtian tunnel of Huangshan-Quzhou-Nanping Expressway of Zhejiang Province is taken as an example. A risk management frame, composed of risk management matrix, daily risk report on the basis of observation data and risk warning system, is established according to the potential damage and probability of harmful cases. The risk management frame proves to be effective in dealing with the risk management during the construction phase of Hunagtian tunnel through the instrumentality of field investigation and crown displacement of YK17+660, which is at the right exit end of Huangtian tunnel, and can provide the basis and ideas for similar projects. Moreover, it is concluded that the establishment of the acceptable risk criterion of mountain tunnel engineering should be based on the allowable deformation limits and the reaction time of surrounding rock of tunnels.

Key words: mountain tunnel engineering; uncertain factor; high risk; risk management; observation

0 引 言

铁路、公路建设及城市地下空间开发皆涉及大量的隧道和地下洞室施工。与其它岩土工程相比, 地下工程是一高风险工程, 主要原因在于其不确定性因素太多, 表现为地质环境复杂、基础信息不充分、施工技术复杂等方面^[1]。同时地下工程对社会环境的影响

也较大, 在施工阶段如处治不当, 极易形成灾难性事故, 如 2008 年 11 月 15 日杭州地铁工地重大塌陷事故。

基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金项目(50621403); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-05-0763)

收稿日期: 2009-05-07

针对现阶段新一轮基础设施建设形势,周丰峻院士指出:“要时刻把安全质量放在第一位”,并成立项目咨询组,重点针对中国“地下工程与基础设施工程公共安全技术”开展咨询研究。

地下工程的高风险特性使得难以完全控制各阶段出现的工程问题。国内外工程界为此引入风险管理的理念,尽可能地保障地下工程的安全。一些发达国家针对地下工程风险管理的研究程度较高,已编写相应法规和规范用于指导地下工程风险管理工作^[2-4]。

中国学者也对隧道和地下空间风险管理作了大量研究^[1, 5-6],对此作了系统论述,统计了国内外隧道工程安全事故、总结了国内地下空间风险管理的现状并提出了相关建议。建设部和铁道部也分别编发了地铁以及地下工程建设风险管理指南^[7]和铁路隧道风险评估暂行规定^[8]。现阶段中国隧道和地下空间风险管理研究主要体现在:风险识别^[5, 9],评估和风险管理软件的开发^[9-11],参建各方人员在风险管理中的相互关系^[12],基于风险管理的工程体系化整合^[13],地下工程寿命周期的风险管理^[14]以及一些地下工程的风险管理实践研究^[15-17]。

风险的概念已贯穿于整个社会,并且具有典型的时空差异性。在岩土工程领域,通常将“风险”与“事故”,或至少与“严重失去控制”的情形联系在一起,其核心目标便是风险控制。因此本文以山岭隧道为例对其建设阶段的质量风险管理框架进行分析。

1 山岭隧道工程风险分析

1.1 风险来源

山岭隧道工程的开挖会剧烈改变其周围岩土体的自然状态和应力环境,因此山岭隧道工程与自然环境之间的相互作用相对其它岩土工程而言要显著得多。以现有的技术条件,工程技术人员仍无法完全认识隧址区的地质环境,如岩体的非均质各向异性、局部的软弱夹层分布、岩体内部节理密集带位置和涌流通道等。这些不可预见因素在勘察和设计阶段可通过统计学方法得到部分解决,但仍有相当多不利于工程的不可预见因素要留待施工时才得以发现和处理。当隧道位于岩土体的介质结构和赋存环境较为复杂区域时,这种情形尤其明显。同时,隧道建设与被扰动的地质环境之间是动态的双向耦合过程,地质环境在遭受隧道建设扰动后又会逆向影响隧道的施工。而这种动态耦合过程在开挖前很难得到定性或定量评价,也存在着较多不可预见因素。

因此,隧道工程在建设阶段需处理大量不能被及时辨识和表征的变化性非常大的因素,工程进展总是

伴随大量的不能被技术人员完全了解的不确定性因素。这些不确定因素或变化因素便成为山岭隧道建设的风险来源。与其它类似因素变化情形少得多的工程类型相比,风险是山岭隧道工程设计和建设过程中的固有元素,风险管理已成为处理高难度隧道构筑物不可缺少的环节。

1.2 风险分配模式

山岭隧道工程中的风险管理可被视为综合质量管理体系的一个方面。从该角度来讲,在工程周期内可将风险管理理解为改善工程质量的连续过程。通过尽可能早地识别和预处理、工程修正和技术措施,可降低或规避风险。工程中残留的风险需要通过系统的监控量测确保及时辨识其不利的发展方向并进行整治。

由此,风险管理涉及业主、工程勘察方、设计方、监理、现场监测人员及施工方,而在某些地区可能还涉及保险业人士(图1)。

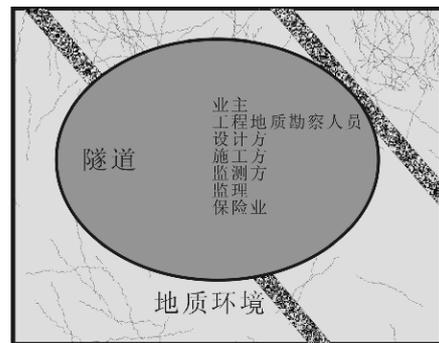


图1 涉及隧道风险分析的相关人员

Fig. 1 Parties involved in risk analysis of tunnels

对于某些业主而言,将风险转移至施工方极具吸引力,但这绝非完美的解决方案,因为这会严重影响工程质量和进度。风险共享是介于二者之间受欢迎的解决方案,但并不总是有效。从技术角度说,工程各阶段的研究工作得以在一定广度和深度上进行是风险控制的关键所在。因此,于工程各阶段进行细致研究并在相关合同中充分考虑风险细节基础上的风险共享是最为合适的。

1.3 山岭隧道工程建设阶段风险管理措施

风险存在于隧道工程建设各阶段(表1)。随着对工程细节的了解,可从工程初始阶段的岩土问题至施工阶段更多相关建设问题进行风险管理。利用表1中的风险管理措施,可大幅降低隧道工程的风险(图2)。

图2表明,尽管可通过风险管理削减风险,但山岭隧道工程仍存在一定的残留(不可避免)风险,该部分风险仅能通过风险管理进行控制。由于中国大部分隧道采用新奥法施工,而该方法的主要特点即是通过多种量测手段对开挖后隧道围岩进行动态监测,并

以此指导隧道支护结构的设计(变更)与施工。故本文认为山岭隧道工程施工中的监控量测是进行残余风险控制的有效手段。

表 1 山岭隧道工程建设各阶段风险管理措施

Table 1 Risk management measures during construction of mountain tunnel engineering

工程阶段	风险管理措施
选线和勘察	辨识常见的工程地质风险因素 初步风险分组, 确定重点对象 优化路线及构造物位置, 规避风险 评估和选择基本的施工工法
施工图设计	对选定的路线和施工工法进行风险评估 确定已辨识风险的发生概率及潜在损失 通过适当的设计及其它方案削减风险 确定残余风险、施工阶段围岩的预期响应 确定监测方案的判断准则
招投标	明确风险主体 确定能公正处理不确定性因素的方法 可将承包方纳入风险管理体系
施工	制定安全管理系统 强调和组织监控量测工作

型及其响应。

(3) 隧道容许变形和实际变形的对比, 并根据已有经验作出适当调整。

(4) 超出容许变形后隧道反应的详细记录。

(5) 紧急事件的变形警示阈值、组织、优先考虑的事物和措施等。

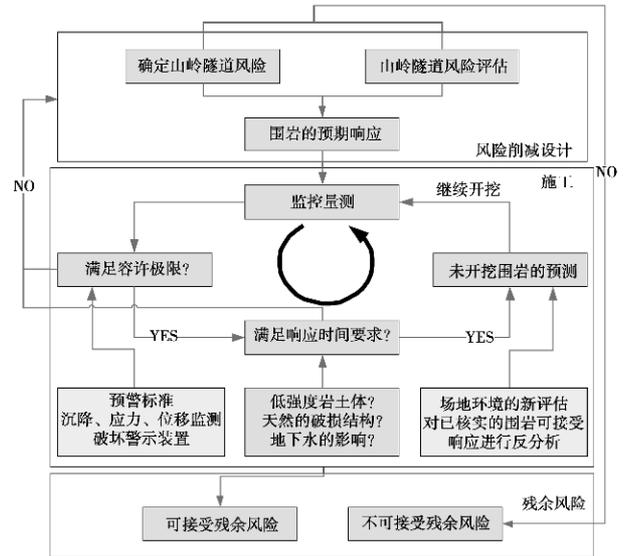


图 3 基于监控量测的风险管理

Fig. 3 Risk management based on observation methods

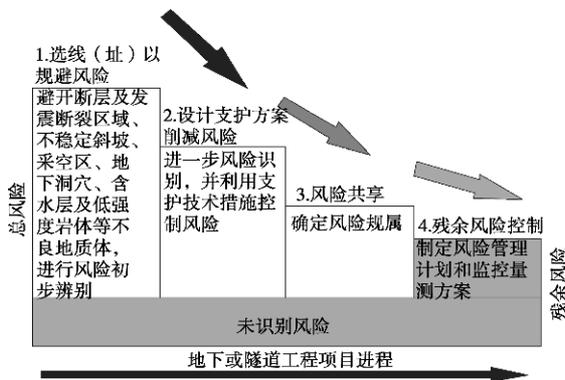


图 2 工程各阶段风险管理及风险降低(据 P. Schubert^[18]修改)

Fig. 2 Risk management and risk reduction during project phases

2 施工阶段基于监控量测的风险控制

2.1 风险管理计划

由于自然环境的不确定性因素, 施工初期通常仍存在相当数量的残留风险, 包括不能规避的已知风险或仍未识别的风险。风险(或安全)管理计划是施工前工程质量管理体系的要素。从业主的角度来说, 风险管理计划主要有以下 5 部分(图 3):

(1) 隧道围岩必然响应(拱顶沉降、收敛变形及地面沉降等)及其容许阈值的确定。

(2) 设立足够的人员和技术装备以监测隧道及其主要影响因素, 如围岩分级、预测掌子面后续岩土模

2.2 基于监控量测的风险控制

经验表明, 围岩的预期变形容许极限值与实际情况有较大差别, 因此可利用监控量测的大量数据进行评价并进行可接受安全度的建立。合适的响应时间和后续变形预测(包括容许极限值)是监测方案中必不可少的两大要素。如果该两类要素监测值不符合既有风险控制标准, 则可据此变更设计方案或施工工法, 重新拟定风险消减措施。所以, 直接的应力(应变)测量、地质环境变化的新信息、最近监测数据的统计及反分析非常有效。基于风险控制的目的, 安全管理计划必须允许持久监控量测的实施, 以发现地下工程未开挖围岩的新情况。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

浙江黄衢南高速公路璜田隧道为小净距浅埋隧道, 其中左线起止桩号为 ZK17+431—ZK17+700, 右线起止桩号为 YK17+430—YK17+710。

隧址区属侵蚀剥蚀丘陵地貌, 相对高差约为 80~100 m。出口处斜坡坡向及坡度约为 140°∠45°, 上覆第四系残坡积碎石土, 褐黄色, 较松散, 其中碎石呈次棱角—棱角状, 黏性土充填, 胶结差, 厚度随地形而变化, 一般坡脚处较厚; 下伏上震旦统陡山沱组

表2 璜田隧道采用的风险矩阵

Table 2 Examples of risk matrix applied to Huangtian tunnel

		Risk = PD					
		D=10	D=5	D=3	D=1	D=0.5	D=0.1
不良事件发生可能性(P)		有人员伤亡和财产损失, 已对第三方造成损害	仅涉及财产损失, 损害不涉及第三方	需要特殊处理措施, 合同中无明确规定	一般性的处理措施, 特定区域超出预料风险	一般性的处理措施, 与预期风险近于一致	已有处治设计方案, 与预期风险一致
多次	10	100(VH)	50(VH)	30(H)	10(M)	5(L)	1(VL)
很可能	5	50(VH)	25(H)	15(M)	5(L)	2.5(VL)	0.5(VL)
可能	2	20(H)	10(M)	6(L)	2(VL)	1(VL)	0.2(VL)
不一定	1	10(M)	5(L)	3(VL)	1(VL)	0.5(VL)	0.1(VL)
很少	0.5	5(L)	2.5(VL)	1.5(VL)	0.5(VL)	0.25(VL)	0.05(VL)
几乎没有	0.1	1(VL)	0.5(VL)	0.3(VL)	0.1(VL)	0.05(VL)	0.01(VL)

(Z_{2d}) 灰黄色—青灰色细砂粉砂岩、粉砂质泥岩, 质脆, 产状 332° ∠50°。基岩强风化带呈褐色—褐灰色, 薄层状, 土夹碎块石状, 裂隙极为发育, 裂隙面上可见有黄褐色铁锰质浸染; 弱风化基岩呈青灰色, 薄—中厚层状, 节理裂隙较为发育, 裂隙面可见有黄褐色铁锰质浸染, 为层状碎裂结构, 岩石中含有角砾, 角砾成分主要以火山岩为主, 胶结较好。

地下水为表层松散岩类孔隙潜水和风化基岩裂隙水, 主要受大气降水补给, 地下水量较为贫乏。浅表层裂隙较为发育, 为地表水提供了下渗通道。

3.2 风险辨识

由隧址区地质背景可知, 璜田隧道可能的风险类型有:

- (1) 洞口不稳定边坡。
- (2) 低强度岩土体的施工问题。
- (3) 工程对隧址区的影响, 如不均匀沉降、双洞开挖的相互影响等。
- (4) 强降雨条件下洞内渗水及渗水对围岩的影响。

3.3 风险管理矩阵的建立

风险是不良事件发生可能性和潜在破坏程度的产物, 可将其视为二者的乘积, 以便进行量化评价。但在大多数情形下, 缺少精确计算上述参数的基础, 此时多位专家的经验判断相对单纯的计算更具有效性。由此根据隧道的地质勘察资料、设计图集、工程实际状况及其预期可接受风险, 结合多位专家的经验判断, 对不良事件发生可能性和潜在破坏程度进行量化处理, 在监控量测数据基础上将定性判断转化为量化指标, 使最终风险计算值在区间 (0,100) 变化 (不含 0 值表示隧道工程总存在风险), 见表 2。

表 2 表明, 当破坏程度达到 3 时, 就需要应用重要措施对合同中没有预先规定的问题进行整治, 而这将带来巨大的成本; 当涉及事故和未预见的重大事件

时, 破坏程度可达 5~10。破坏程度 5 意味着因修复或重建而带来的财产损失或经济损失, 但仍限制在涉及工程的局部范围内。而破坏程度 10 就包括人员伤亡, 大多数情况下, 除经济和重大财产损失外, 该类型破坏已引起公众注意。风险分级及其含义见表 3, 不良事件发生可能性说明见表 4。

表3 璜田隧道风险分级

Table 3 Risk rating of Huangtian tunnel

风险	符号	含义
>50	VH	不允许出现的情形, 必须变更设计
20~49	H	
10~19	M	在原支护方案基础上加强紧急支护
5~9	L	可接受风险, 但仍需通过监测进行风险管理
0~4	VL	很低的残余风险, 加强日常观察

表4 不良事件发生可能性

Table 4 Probability of harmful cases

可能性描述	含义
多次	工程建设过程中发生过多次
很可能	工程建设过程至少发生过一次
可能	本工程没有遇到, 但相似工程中时有发生
不一定	本工程没有遇到, 但相似工程中曾有发生
很少	发生可能性不大或处理难度较小
几乎没有	发生的可能性非常小

3.4 基于监控量测的风险评估

为了利用监控量测数据进行风险评估, 还需建立该隧道各监测断面简洁明了的风险日报表 (表 5) 及建立预警系统级别 (表 6)。

至此, 以璜田隧道为例建立了基于监控量测的风险管理框架。通过表 5 可清楚的了解各监测断面的风险状况及其预警级别。如果达到了预警级别, 将会给出说明和处理措施, 然后根据表 2~4 进行未开挖围岩的风险预测。

表 5 璜田隧道右线的风险日报表

Table 5 Daily risk report applied to right line of Huangtian tunnel

断面	预警系统			影响 因素	处理措施
	正常 0	异常 1	紧急 2/3		
YK17+670	√				
YK17+660	√				
YK17+645	√				
YK17+635		!		a	及时初支
影响因素	a			因素 1: ...	
类别	b			因素 2: ...	

注: √为正常, !为异常, *为紧急。

表 6 璜田隧道的预警系统级别

Table 6 Levels of risk warning system of Huangtian tunnel

级别	说明
0	围岩响应在预期范围之内
1	围岩响应超过预期阈值, 出现异常情况
2	即将产生危险, 但危险未涉及第三方或公众
3	即将产生危险, 危险已涉及第三方或公众

事实上, 在地质条件变化较大的地段, 预测和预警标准常常不符。不过, 总的监测数据通常能对隧道稳定性作出好的评价和预测。这也就是本工程中为何采用大量的定性预警指标而非定量数据的原因所在。

3.5 YK17+660 断面风险预警实例

2008 年 1 月 6 日, 璜田隧道出口端右线施工至 YK17+645 m, 开挖掌子面揭示 Z₂d 灰黄色—青灰色细砂粉砂岩, 岩石新鲜, 呈弱风化状态, 中厚层夹薄层状岩层, 岩体呈块状结构, 产状为 332° ∠50°, 与洞身走向呈小角度相交; 上覆第四系残坡积褐黄色碎石土。地表沉降监测点最大累计沉降量为 39.75 mm, 洞内 YK17+660 测点累计拱顶沉降量为 9.76 mm, 1 月 6 日该断面的沉降速率达 3.09 mm/d (图 4)。

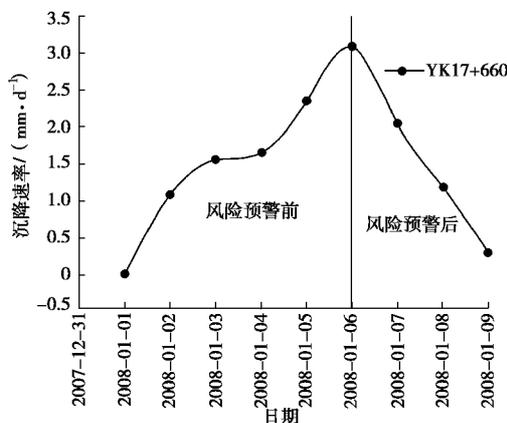


图 4 YK17+660 断面沉降速率

Fig. 4 Crown settlement rate of section YK17+660

现场监测人员测得拱顶沉降异常后, 随即于洞内外展开调查, 发现洞口边坡体发育一贯通性裂缝, 其走向为 330°, 地表可见缝宽约 3~10 mm (图 5)。洞口西侧由于施工开挖形成一倾向 250°, 高约 4~10 m 陡倾边坡, 坡脚处建有工棚, 该处土体呈湿润状态, 有可能产生局部滑塌, 影响施工工棚及人员安全。根据表 2 所示风险矩阵进行风险评估, 评定此时璜田隧道的风险指数为 15 (D=3, P=5), 达到中级风险水平。因此, 监测人员于当日立刻发出预警函, 建议施工单位注意洞内及右洞西侧边坡支护, 以避免损失。

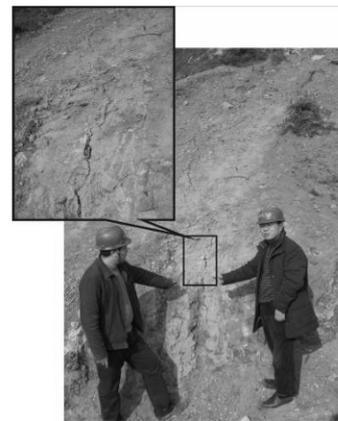


图 5 璜田隧道出口边坡裂缝

Fig. 5 Photos of crack in the slope of Huangtian tunnel

施工单位接到预警函后, 立刻按照预警函所附风险日报表中建议处理措施进行处治。从图 4 可看出, 经过处治之后, YK17+660 断面拱顶沉降速率随即下降, 接近正常风险范围。

4 讨 论

(1) 由于地质环境的复杂性及现有技术手段的限制, 仍具备一些不能被辨识出的风险或残余风险, 山岭隧道工程建设过程中存在大量不可预见性因素, 导致该类工程是高风险工程, 因此极有必要在该类工程建设过程中进行风险管理和控制。但由于具体工程实际状况、处治技术措施及业主对可接受风险程度的差异性, 不同的隧道工程应具有不同的风险接受准则。本文认为山岭隧道工程的风险接受准则应综合以下两方面进行考虑: ①隧道围岩在施工过程的变形容许极限; ②隧道围岩变形的响应时间。上述两方面内容均可通过设计文件和相应规范获知。

(2) 本文所建立的风险管理矩阵是基于璜田隧道的实际工程状况。但由于不同隧道具有不同的地质背景, 其施工工法也随之有所区别, 因此不同隧道的风险类型和风险管理矩阵在形式上可能存在差异。于每一工程而言, 根据地质环境、设计文件确定潜在破坏

及发生概率非常有必要,不能直接应用源于其它工点的风险矩阵。但本文所提出的山岭隧道工程风险管理框架可为类似工程提供一定依据和思路。

(3)工程人员和学者在研究地下或隧道工程建设时,总是自觉地将其与地质环境联系到一起。但地质环境具有高度不确定性。当进行地质因素的量化时,可能误差的范围、缺陷及相关风险会增加。因此,理解地质环境所传递的工程学信息非常重要,而这导致处理具有很多不确定性因素的复杂环境的经验尤为可贵。数学分析模型和计算程序对于解决地下工程风险管理是非常有用的工具,但决不能应用那些未经验证和差异控制的模型和程序。

(4)基于监控量测的风险管理和控制方法能较好地进行风险评估和预测,在地下或隧道工程建设中具有举足轻重的作用,但仅能于施工及运营阶段应用,无法满足地下工程施工阶段前的风险识别和评估要求。因此,应强调工程区场地环境详细的工程地质勘察和工程设计,而且风险识别必须贯穿于整个勘察和设计阶段。这是因为随着勘察和设计的推进及明确的施工方案,会涌现一些另外的信息,某些已有风险会消失,也会产生新的风险。

(5)本文的风险管理方法基于图3所示的监控量测方法。就目前而言,在充分的工程地质勘察和设计基础上,该方法足以满足浅埋山岭隧道的风险管理要求,但对于深埋隧道却不一定有效。深埋隧道具有更多的未知因素,其风险在显现前一直呈未知状态,因此仍需研究并确定适宜的方案进行风险管理。

5 结 论

(1)地质环境中大量的不确定及变化因素为山岭隧道工程建设及其相关人员带来高风险;通过建设阶段的风险管理和控制措施,可降低风险,但山岭隧道工程仍存在残余风险。

(2)针对山岭隧道工程的残余风险,提出了基于监控量测的风险管理框架,并以浙江黄衢南高速公路璜田隧道为例,对潜在破坏程度和不良事件发生可能性进行量化处理后建立了风险管理矩阵,以YK17+660断面的实际监控量测数据验证了该风险管理矩阵的有效性。

(3)本文所建立的风险管理矩阵可为类似工程的风险管理提供一定依据和思路,并建议山岭隧道工程风险接受准则的建立需要从隧道围岩的变形容许极限及其响应时间两方面入手。

(4)由于地质环境的复杂性及高度不确定性,处理与之相关工程问题的经验极为可贵,并应慎用那些

未经实际工程验证和差异控制的数学分析模型和计算程序。

(5)浅埋隧道工程中的风险管理并不需要特别难的方法或技术。但是,必须开展其风险管理工作,以保障新一轮公路交通、铁道和城市轨道交通开发等基础建设“又好又快”的有序推进。

参考文献:

- [1] 钱七虎,戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 649 - 655. (QIAN Qi-hu, RONG Xiao-li. State, issues and relevant recommendations for security risk management of China's underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649 - 655. (in Chinese))
- [2] ESKE SWN S D, TENGBORG P, KAMPMANN J, et al. Guidelines for tunneling risk management: international tunnelling association working group No. 2[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(3): 217 - 237.
- [3] The British Tunnelling Society. The Association of British Insurers: Joint code of practice for risk assessment of tunnel works in the UK-09[M]. London: The British Tunnelling Society, 2003.
- [4] The International Tunnelling Insurance Group. A code of practice for risk management of tunnel works[S]. 2006.
- [5] 陈 龙, 黄宏伟. 岩石隧道工程风险浅析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 110 - 115. (CHEN Long, HUANG Hong-wei. Risk analysis of rock tunnel engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 110 - 115. (in Chinese))
- [6] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 13 - 20. (HUANG Hong-wei. 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. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国建设部. 地铁及地下工程建设风险管理指南[M]. 2007. (Ministry of Construction, the People's Republic of China. Risk management guide of metro and the mass transit project[M]. 2007. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道风险评估暂行规定(报批稿)[S]. 2007. (Ministry of Railway, the People's Republic of China. Railway tunnel risk assessment interim provisions(draft)[S]. 2007. (in Chinese))
- [9] 何锡兴,周红波,姚 浩. 上海某深基坑工程风险识别与

- 模糊评估[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1912 - 1915. (HE Xi-xing, ZHOU Hong-bo, YAO Hao. Construction risk identification and assessment of a deep foundation pit in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1912 - 1915. (in Chinese))
- [10] 陈神龙, 陈龙珠, 宋春雨. 基于模糊综合评判法的地铁车站施工风险评估[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 32 - 35. (CHEN Shen-long, CHEN Long-zhu, SONG Chun-yu. Fuzzy synthetic evaluation on risk of subway station construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 32 - 35. (in Chinese))
- [11] 黄宏伟, 曾明, 陈亮, 等. 基于风险数据库的盾构隧道施工风险管理软件(TRM1.0)开发[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 36 - 41. (HUANG Hong-wei, ZENG Ming, CHEN Liang, et al. Risk management software (TRM1.0) based on risk database for shield tunnelling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 36 - 41. (in Chinese))
- [12] 白云, 汤竞, 毛建民. 试论地下工程风险管理中参建各方的地位与作用[J]. 土木工程学报, 2009, **42**(1): 124 - 129. (BAI Yun, TANG Jing, MAO Jian-min. Discussion on the role of parties involved in the risk management of underground constructions[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, **42**(1): 124 - 129. (in Chinese))
- [13] 尤建新, 谭旋, 杜学美. 以风险管理为核心的地铁工程一体化体系整合[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 28 - 31. (YOU Jian-xin, TAN Xuan, DU Xue-mei. The subway engineering integrated management system based on risk management[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 28 - 31. (in Chinese))
- [14] 陈桂香, 黄宏伟, 尤建新. 对地铁项目全寿命周期风险管理的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 47 - 51. (CHEN Gui-xiang, HUANG Hong-wei, YOU Jian-xin. Study on life cycle risk management of metro[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 47 - 51. (in Chinese))
- [15] 陈龙, 黄宏伟. 上中路隧道工程风险管理的实践[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 65 - 69. (CHEN Long, HUANG Hong-wei. The practice of risk management in Shangzhong road tunnel engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 65 - 69. (in Chinese))
- [16] 周红波, 姚浩, 卢剑华. 上海某轨道交通深基坑工程施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1902 - 1906. (ZHOU Hong-bo, YAO hao, LU Jian-hua. Construction risk assessment on deep foundation pits of a metro line in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1902 - 1906. (in Chinese))
- [17] 陈晖, 孙莉, 李韬, 等. 上海典型地质条件变异性引起的基坑工程失效风险分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1907 - 1911. (CHEN Hui, SUN Li, LI Tao, et al. Risk analysis of foundation excavation under typical geological conditions in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2006, **28**(S1): 1907 - 1911. (in Chinese))
- [18] SCHUBERT P. Geotechnical risk management in tunnelling[C]// Geotechnical Risk in Rock Tunnels, London, 2006: 53 - 63.