

宜万铁路岩溶隧道风险管理

朱鹏飞

(铁道部宜万铁路建设指挥部,湖北恩施 445000)

[摘要] 宜万铁路地形、地质条件之复杂,集西南山区铁路之大成。建设条件之艰、难、险居我国铁路历史之最。为减少岩溶突水突石的灾害发生,首次引入了风险管理的理论并应用到实践之中,第一次提出了高风险的概念,建立了系统全面的应对高风险管理措施,其中地质勘察监理、超前地质预报、安全分级管理、水文监测、防灾报警系统等应对措施是第一次在铁路工程中进行了研究和应用。为其他岩溶隧道的风险管理提供了思路和方法。

[关键词] 岩溶隧道;风险管理;风险应对措施

[中图分类号] U21 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)12-0020-06

1 前言

宜万铁路所经区域广泛出露震旦系、寒武系、奥陶系、二迭系、三迭系等碳酸盐岩地层,约占全线的75.3%,由于本区具有独特的岩溶地质背景条件,岩溶强烈发育,地表岩溶类型齐全,形态各异,地下岩溶洞穴随处可见,暗河密布,规模宏大,是我国岩溶最发育、最典型的地区之一。

复杂的地形地貌、地质构造、工程地质和岩溶水文地质条件,造就了该区不良工程地质问题的类型多、分布广、规模大的特点,如岩溶、崩塌、滑坡、岩堆、瓦斯、高地应力等不良工程地质现象极为发育,其中又以岩溶及岩溶水害问题最为突出,深埋岩溶隧道开挖过程中存在遇溶腔、岩溶管道、高压导水断层时产生突水(泥)地质灾害问题,对铁路工程的勘察、设计和施工等各方面都提出了严峻的挑战,长期以来,该地区一直被视为铁路工程建设的禁区,被许多专家誉为世界级的难题。

从岩溶发育的垂向性上讲,宜万线浅埋隧道一般都位于岩溶的垂直发育带中,深埋隧道基本都位于岩溶季节变动带和水平循环带的交界部位。受岩溶及岩溶水影响,地表岩溶类型齐全,形态各异,地下岩溶洞穴随处可见,暗河密布,规模宏大,无论是

浅埋还是深埋岩溶隧道,开挖过程中都可能存在遇溶腔、岩溶管道、突泥、突水或出现高压导水断层时产生大型突水(泥)地质灾害问题,施工风险极大。

宜万铁路3 km以上的碳酸盐岩地层隧道共计27座,累计长度175.6 km,洞身穿越可溶岩段落占70%。27座隧道中,在开挖揭示过程中均遇到对隧道工程产生影响的岩溶。其中25座发育干溶洞,占93%,发育的溶腔规模大小不一,具有显著代表性的岩溶大厅为龙麟宫隧道出口DK232+467溶腔,纵向长度约140 m,宽约100 m,发育至隧底以下约80 m;15座揭示过水岩溶管道、暗河,产生突水、突泥,占56%;瞬间突出物(突泥突水总量)超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的3次,分别为野三关隧道DK124+602突水突泥(1 h内突泥、突巨石量约 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,突水量约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$)、马鹿箐隧道出口PDK255+978突水突泥(1 h内突泥量约 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$,突水量约 $70 \times 10^4 \text{ m}^3$,突水瞬时流量达到 $200 \text{ m}^3/\text{s}$)、马鹿箐进口泄水洞突水突泥(1 h内突泥、突石量约 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,突水量约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$);突出物超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的10余次,突出物超过 1000 m^3 的60余次,这些都造成或可能造成巨大的经济损失、人员伤亡灾害,因此必须充分认识到岩溶隧道施工中可能带来的巨大危害,采取有效的措施防范。

[收稿日期] 2009-10-28

[作者简介] 朱鹏飞(1965-),男,上海市人,高级工程师,长期从事铁路工程建设和研究工作;E-mail:box32@tom.com

2 宜万铁路风险管理体系

宜万铁路是我国沿江大通道的重要组成部分,早在孙中山先生《实业计划》中就提出修建川汉铁路的设想,但由于受国力、技术水平所限而被搁浅。现在建设宜万铁路也同样要面临极其复杂的岩溶地质条件。为规避宜万铁路施工高风险,建设单位确立了风险管理目标,建立了较为严密的风险管理体系。

宜万铁路针对岩溶隧道特点对安全、环境、质量、投资、工期和第三方等风险进行,以安全风险为重点,并高度重视具有突发性和灾害性的风险,对安全风险等级评定为高的应采取各种措施予以规避。

宜万铁路岩溶隧道风险管理实行“建设单位总负责,设计、施工、监理分工负责,专家指导、高效联动、齐抓共管”的风险管理机制。按照风险评估划分的等级实施风险等级管理、分级督办的管理模式。核心是明确建设、设计、监理、施工各方对不同风险等级隧道的职责、分工和手段。

2.1 风险管理目标

风险管理目标分为安全目标、环境目标、投资目标和工期目标。宜万铁路安全目标是通过持续的危险识别和风险管理,将人员伤亡或财产损失风险降至并保持在可接受的水平或其以下;环境目标是不对环境造成无法恢复的灾害;投资目标是投资控制在处理同类工程费用的较低水平;工期目标是控制在既定的工期目标内。以安全、环境目标为主,兼顾其他。

2.2 管理机制

建设单位总负责,设计、施工、监理分工负责,专家指导、高效联动、齐抓共管。由于宜万铁路复杂岩溶高风险隧道地质极其复杂,前期施工多次发生重大安全事故,建设工期大大滞后。面临巨大的安全风险和工期压力,坚持“以人为本”,以人的生命安全为第一目标,创新建设单位在重大关键技术决策上必须起核心主导作用的新理念,成立以指挥长为组长的 I 级风险隧道重大技术方案管理小组,组织参建各方集思广益,分析前期风险隧道施工安全、技术方案等方面的成败得失,邀请国内外专业注浆公司和专业冷冻公司现场调研,召开院士、专家复杂岩溶隧道设计施工技术论证会,对帷幕注浆、冷冻法、释能降压 3 种重大技术方案进行反复研讨、论

证,并据此果断决策重大技术方案,并监督各方严格按照确定的技术方案执行,方案变更必须经过相应程序,不得擅自更改。重大施工技术方案经过反复的实践探索、专家论证,大胆创新、果断决策在旱季采用释能降压法施工,使得长期受阻的四座 I 级风险隧道溶腔在短短的两个半月之内安全顺利贯通,规避了岩溶隧道施工高风险,杜绝工程灾害的发生,防止了不可遇见地质灾害所造成的经济损失和人员伤亡,确保了在旱季完成溶腔结构处理的总体工期目标。

2.3 管理模式

实施风险等级管理、分级督办。建立和落实现场安全管理制度。对风险隧道进行分级管理,制定施工安全等级管理制度,落实安全隐患分级督办,完善防灾报警系统,规划安全逃生线路,下发风险征兆明白卡,设置专职安全员,定期组织逃生演练等。

2.4 管理核心

明确建设、设计、监理、施工各方对不同风险等级隧道的职责、分工和措施。

2.5 风险管理理论的运用

2.5.1 风险识别

风险是指后果(损失)发生的不确定性,它是不利事件发生的概率及其后果的函数。即 $R = f(p, C)$,其中, R 为风险; p 为不利事件发生的概率; C 为不利事件的后果(损失)。

由于宜万铁路沿线隧道的工程地质、水文地质条件十分复杂,类似工程的历史经验及统计资料不多,又由于隧道的某些风险很难在短时间内用统计的方法或其他方法得到证实,故在对其风险辨识时,在设计技术交底和各参建单位集体图纸审核的基础上,不仅要看到设计明示的风险源,更要找出潜在的或可能隐含的风险源,充分发挥参建四方核心技术、管理骨干智慧,对可能存在的施工风险进行研讨。

宜万铁路通过采用工程类比法、德尔菲法、经验积累等方法,对风险源及危险程度的认知水平不断提高,确定复杂岩溶的风险项目主要有以下 23 项:岩溶突水突泥突石、空腔掉落石块、深溶腔人员坠入、洞口崩石、洞内塌方;反坡排水失效、掌子面和止浆墙失稳、注浆失效、初期支护大变形、衬砌结构破损;洞内交通事故、用电事故、火灾。工期延误影响铺架、工期延误影响总工期;投资增加、措施费用增加、增加抢险费用、结构破坏引起费用增加;决策失误、项目经理选择失误、现场管理人员经验不足、现

场作业队伍选择不当。

2.5.2 风险评估

宜万铁路岩溶隧道工程施工基本风险项目,既无大量的实验数据,又无足够的历史数据,只能从以往特征相似的隧道工程施工中,曾经发生的安全和影响环境的事件,结合宜万铁路隧道工程的水文地质、工程地质条件等环境因素,组织相关专家根据经验,分析和估计基本风险事件发生的概率、所产生的后果(损失值)及每一项后果发生的可能性(概率)。

灾害发生的基本条件:一是特殊的地质构造基础;二是丰富的地下水源补给;三是足够的填充物质条件;四是人为的开挖扰动激活^[1]。复杂岩溶隧道真正难以控制,能够致灾的是由于一定规模的溶洞和破碎带溶腔水体或充填物质具有较高压力,在隧道施工发生中发生突水、突泥。

风险评价是指在风险识别和风险估计的基础上,把风险发生的可能性、损失严重程度,结合其他因素综合起来考虑,得出项目发生风险的危害程度,再与风险的评价标准比较,得出项目的风险等级。然后根据项目的风险等级,决定是否需要采取控制措施,以及控制措施采取到什么程度。

2.5.3 风险控制

风险控制包括所有为避免或减少项目风险发生的可能性及其潜在损失的各种措施。包括风险预防、风险减轻。其中风险减轻又有控制风险损失、分散风险和后备应急措施3种方式。

宜万线岩溶隧道工程施工中可能遭遇的风险点多而分散、不确定因素多、偶然性极大,防范极度困难。风险控制是根据风险管理的目标和宗旨,针对风险识别和分析出的结果,即在隧道建设过程中可能存在的风险,合理选择风险管理工具,制定出处置风险的总体方案的活动,尽可能使风险造成的损失降到最低。

按照风险管理的目标,风险控制可分为风险预防和风险抑制两个方面,前者的目的是降低风险发生的概率,后者是减小风险的幅度。

在宜万铁路隧道工程的修建过程中,由于风险因素来源复杂,因此对各项风险来源制定了专门的风险控制措施。具体方法是采用综合地质预报系统准确判断溶腔规模、类型及边界,对可能发现灾害性溶腔制定安全进洞条件,监测降雨量和溶腔的水量、水压及变化趋势,在完备的预警预报系统的保护下,通过全方位水文专项监测、区域水文地质分析,采用

有效的溶腔处理方案,在合适的时机进行溶腔的处理。主要措施有宜万铁路建设防范高风险专项机制(施工地质勘察与超前地质预测预报;突发性事件防范应急预案;应对复杂地质、工程难题的设计和施工预案;重难点工程监控;隧道施工量测监控;严格规范施工工艺监控;严格履约考核奖罚和信息收集、反馈和快速反应专项机制)、动态设计措施、释能降压法、专家咨询制度等。

2.5.4 风险监控

风险监控是指通过对项目风险发展变化的观察和把握,评估风险危险程度和风险处理策略和措施的效果,并针对出现的问题及时采取措施的过程。在项目的实施过程中,风险会不断发生变化,可能会出现许多未预料到的新情况,因此必须定期反复随着工程项目的进展,密切跟踪已识别的风险;识别新的风险;进行风险识别、风险分析与评估,细化风险控制措施,分析工程项目目标的实现程度,以及根据风险因素的变化采取相应的措施,及时修改风险控制计划,实现消除和减轻风险的目标。

风险监控的主要内容有:a. 工程项目风险处理措施是否按计划正在实施,实施效果如何,是否需要制定新的风险处理措施;b. 对工程项目施工环境的预期分析以及对工程项目整体目标的实现可能性的预期分析是否仍然成立;c. 工程项目风险的发展变化是否与预期的一致;d. 已识别的工程项目风险哪些已发生、哪些正在发生、哪些可能后来发生;e. 是否出现了新的风险因素和新的风险事件。

宜万线岩溶隧道工程风险管理是一个动态的过程。特别是由于施工环境和条件的复杂性、不确定性、多样性和隐蔽性,在宜万铁路施工过程中,风险不断发生变化,并随时有新的风险出现,或原本预计的风险可能没有发生。因此,对岩溶隧道工程进行监控,及时采取应急措施非常重要。

2.5.5 风险后评价

宜万线岩溶隧道工程建设过程中,根据实际风险情况与预测情况的差别、实际风险处理方案与建议方案的区别、现场实施方案后的效果情况与预期的差异,定期动态掌握当前风险控制措施的有效性,以达到在施工高风险岩溶隧道的风险管理实践中提升能力和优化风险管理的目的,同时也完成一个动态的风险管理过程。通过不断改进和吸取经验,提高风险管理的水平,达到对风险管理的目的。

3 宜万铁路风险管理过程

2003年3月,在铁路工程中首次引入地质勘察监理工作。

2003年9月,组织召开隧道地质超前预报技术交流研讨会,8个国家的地质预测预报专家和国内的专家参加了会议,研讨了宜万铁路如何采取先进科学的地质预测预报技术和方法,规避施工建设期间的风险和确保施工安全。

2004年5月,完成《野三关隧道工程风险评估和控制的研究》,将风险管理引入了宜万铁路。

2004年7月,制定《宜万铁路建设防范高风险专项机制》,提出了岩溶隧道施工期“高风险”的概念,提出全员、全方位、全过程防范和化解高风险。

2004年10月,制定《宜万线复杂隧道施工地质实施细则》,提出施工期隧道施工地质工作,特别是超前地质预测预报是规避风险、确保隧道施工顺利进行的重要保证,关系到宜万线工程建设的成败。

2005年1月,制定《施工阶段核实地质内容及要求》,明确提出了对隧底采用钎探、地质雷达等方法进行隧底岩溶普查和地质补勘工作。

2006年1月,对全线隧道进行了一次全面排查,对隧道风险进行了分级,其中I级风险隧道8座,可能出现大规模岩溶突水突泥隧道。II级风险隧道26座,可能出现局部突泥突水或大型干溶腔隧道。

2006年11月,对注浆管理办法进行了细化,对注浆设计、施工管理和技术资料等三方面提出了具体要求。

2007年12月,成立铁道部指挥部,加强建设管理力度,同时,5座I级风险隧道的设计、施工、监理力量得到全面加强。

2008年期间,建设指挥部成立风险隧道工作组、注浆督导组 and 释能降压攻关组,确定了隧道分级督办,制定了地质预报和注浆管理标准化,组织召开了7次专家论证会,76次重大技术方案和预案讨论会,引进专业注浆队伍。

2008年11月,建设指挥部提出释能降压新工法,经专家论证可行后,11月至12月,分别对云雾山、大支坪、马鹿箐、野三关等4座隧道采用释能降压法安全可控的揭示了大型充填性溶腔。

2009年6月,建设指挥部召开齐岳山隧道专题会议,明确了引进的注浆科研单位和隧道开挖施工

单位的技术方案、施工组织、安全质量和工期目标。

4 风险管理的实施与效果评价

宜万铁路风险管理从方案决策、管理制度、风险识别、技术应对、风险规避5个体系入手进行管理。图1是体系组织模式框架图。

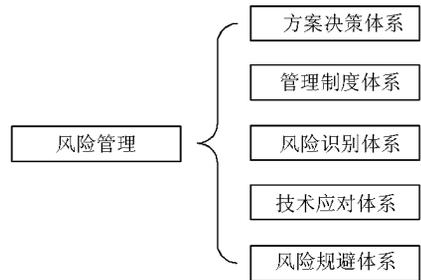


图1 体系组织模式框架图

Fig.1 System model of the framework of the organization Chart

宜万铁路作为目前在建的铁路系统内公认的高难度、高风险项目,除几乎具备一般建设工程的全部施工难题和风险外,长大隧道穿越地区岩溶发育的地质问题与其他工程相比,其建设中存在的多样性、复杂性、不确定性和隐蔽性更加突出,突水突泥的风险程度及工程处理难度为国内外罕见,灾害造成的后果更加严重。

在宜万铁路的工程建设实践过程中,将风险管理理论与宜万铁路岩溶隧道工程充分结合,在隧道施工过程中不断调整、完善、提高,进而总结形成一系列有针对性的岩溶隧道工程建设的风险管理措施制度,防范隧道施工风险,有效的规避风险和减小岩溶灾害危害性,实现项目安全控制目标。

4.1 方案决策体系

重大风险的出现往往是由于重大技术方案与现场复杂地质不符所引起。因此,宜万铁路建设在方案决策体系中坚持两个核心内容。

一是充分发挥建设单位的主导和核心作用。成立以指挥长为组长的I级风险隧道重大技术方案管理小组,组织审查、论证、决策、批准重大技术方案;二是成立以指挥部领导为组长的风险隧道工作组和特别管理小组,现场组织和监督重大技术方案的实施。

在云雾山、野三关、马鹿箐、大支坪4个高压富水充填溶腔技术方案上,存在着堵与放两种截然不同的方案。堵的方案在以往工程中有实例,但存在

着注浆效果不能满足施工安全的隐患,而放的方案又没有工程实例可以借鉴。针对堵与放两种方案,建设指挥部组织专家论证,创新工法,果断实施,从而使长期困扰宜万铁路建设的4个溶腔相继得到突破、贯通。在施工中既化解了安全风险,又节约了成本、缩短了工期。

4.2 管理制度体系

建设指挥部根据宜万铁路高风险的特点,制定了《宜万铁路建设防范高风险八项机制》、《宜万铁路复杂隧道施工地质实施细则》、《宜万铁路岩溶隧道注浆施工管理实施细则》等管理制度,管理制度现场的落实,对宜万铁路化解高风险起到了极其重要的作用。

4.3 风险识别体系

风险识别体系包括隧道风险评估、隧道风险分级、施工地质预测预报、水文监控4个方面的内容。图2是风险识别体系框图。

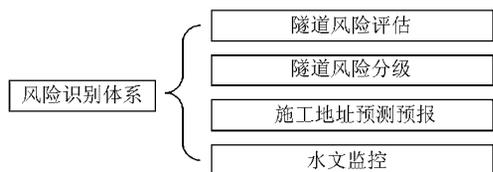


图2 风险识别体系框图

Fig.2 Risk identification system block diagram

隧道风险评估:宜万铁路野三关隧道在开工时就进行了风险评估,是国内铁路建设首次使用。在铁路建设过程中,又相继对其他隧道进行风险评估。

隧道风险分级:根据隧道风险评估结论,对风险隧道进行分级。宜万铁路有I级风险隧道8座,II级风险隧道26座。根据分级结果,采取风险分级督办。

施工地质预测预报:宜万铁路首次将预测预报纳入工序管理,并提出“有疑必探、不探不进”的安全施工理念。通过施工地质预测预报,多次探测到隧道前方不良地质,为化解施工风险起到了重要的作用。

水文监控:对地表降雨量、地表水位、洞内水量、洞内水压力、水文监测进行专项设计,纳入工程管理,找出地下水的规律和特征,为隧道防灾提供了可靠的依据,指导安全施工。

4.4 技术应对体系

1) 注浆标准化管理:处理高压富水溶腔和高压

富水大断层方法主要采取注浆法,而注浆法又是一项隐蔽型工法,一旦失败,将不可避免发生突水突泥。注浆法实施的成功与否主要受实施者的经验水平所控制。

针对齐岳山隧道F11断层高压富水、地层软弱破碎的特点,组建专业化队伍、专业设备进行科研攻关。同时,成立注浆督导组,从技术方案、注浆过程控制、注浆效果评定、微振爆破快速开挖支护等多个方面进行监控,从而使注浆效果达到工程安全施工的要求。

2) “释能降压”新工法创建与应用。针对宜万铁路高压富水溶腔,我们对注浆法、冷冻法和释能降压法进行了充分的论证和比选,为确保施工和运营安全,针对大型充填型溶腔的特点,确定实施释能降压法。有计划、有目的地采取“查找溶腔→锁定溶腔→打开溶腔→处治溶腔”4个阶段,实现溶腔存储能量的释放,从而降低施工及运营风险。“释能降压法”成功处治云雾山、马鹿箐、野三关、大支坪溶腔,新工法的开发与应用对隧道安全施工起到了极其重要的作用。

4.5 风险规避体系

风险规避体系包括:安全进洞条件、安全生产制度及培训、设立专职安全员、视频监控系统、声光报警系统、应急照明系统、安全逃生系统。图3是风险规避体系框图。

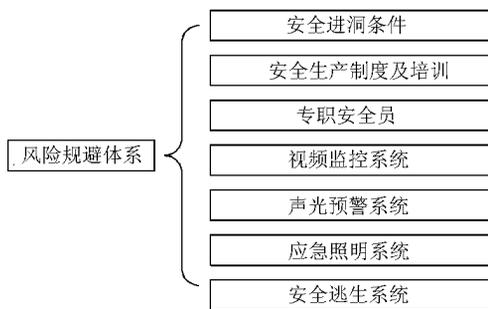


图3 风险规避体系框图

Fig.3 System block diagram of risk aversion

5 结语

复杂岩溶隧道的建设尚无系统的、完整的、可操作性的风险管理理论和经验可借鉴。随着我国铁路发展的推进,将会有更多隧道面临建设过程中的高风险,控制工程灾害的发生,减少不可预见地质灾害

所造成的经济损失和人员伤亡,是我们的责任和义务。宜万铁路岩溶隧道工程建设的实践中有很多是超出了在常规铁路建设管理中的程序和方法,需要参建各方采取特殊的措施,也为今后的复杂高风险工程的建设提供了借鉴和参考。

1) 建设单位在风险管理中应起到核心和主导作用。宜万铁路岩溶隧道揭示处理的溶腔 900 余处,发生一定规模的突水突泥 100 余次,建设过程安全责任巨大。建设指挥部在重大技术和施工方案的确定方面,以充分调研和听取参建各方、有关专家意见为基础,科学决策,既敢于决策,又勇于承担责任。在溶腔处理的注浆加固、边界确定、释能降压和结构设计等方案确定过程中,充分体现了建设单位的主导和核心作用。岩溶隧道处理的高风险随时存在,风险岩溶隧道的设计和施工方案不仅需要及时、果断和准确地决策,更需要实施过程中严格按确定的技术和施工方案执行,严密规范的现场管理和大

胆心细的现场处置至关重要。

2) 宜万铁路对岩溶隧道的认知水平和判断也是不断提高的,对溶腔处理的方案,原则是要把风险控制可在接受的范围,其中采用综合手段对溶腔边界和规模进行预报和确认是前提。宜万铁路的实践认为:物探等方法只能是施工阶段的辅助手段,科学的布孔、一定数量的超前探孔和地质取芯是定量查明溶腔的必要手段。实践证明,超前预测预报是有效的、成功的。

3) 开发并应用释能降压新工法和注浆专业化管理,对宜万铁路岩溶隧道的施工安全起到了举足轻重的作用。

参考文献

- [1] 梅志荣,等. 高速铁路岩溶隧道突发地质灾害防治技术研究 [A],中国高速铁路隧道国际技术交流论文集[C]. 北京:中国铁道出版社,2006

Risk management of Karst tunnel of Yichang-Wanzhou Railway

Zhu Pengfei

(Yichang - Wanzhou Railway Construction of Headquarters Ministry of Railways, Enshi, Hubei 445000, China)

[Abstract] Yichang - Wanzhou Railway is the most complicated project in southwest of China. The conditions of construction are the toughest, the most dangerous in the history of China railways. As to reduce the chance of gushing water and projecting mud soil, the theory of risk management have been introduced and applied in practice for first time. At the same time, the conception of high risks has been put forward and the systemic measures for risk management have been established. Some of the measures are studied and applied for the first time in railway projects including supervisor of geometry survey, advance geometric forecast, safe management at different grades, water monitoring and alarm system. All of these can provide experiences for other karst tunnel's risk management.

[Key words] Karst tunnel; risk management; measures for risks