

文章编号: 1006—2106(2009)09—0073—05

# 化解复杂岩溶隧道突水突泥风险应用技术研究<sup>\*</sup>

谢衔光<sup>\*\*</sup> 陈广勋 黄德川

(中铁西南科学研究院有限公司, 成都 610031)

**摘要:** 研究目的: 宜万铁路穿越我国典型的鄂西碳酸盐岩地区, 岩溶隧道总长约占线路长度的 75%。当隧道穿越石灰岩、白云岩等可溶性岩层时, 岩层地质成因常常非常复杂, 极可能发生大型~特大型突水突泥, 将对隧道施工带来巨大危害, 施工应对稍有不慎, 就可能酿成重大甚至特别重大的事故。而目前相关隧道施工规范、铁路工程监理规范并未列出具有操作性的风险控制措施, 且无可供参考的实例, 依然处于摸索阶段。因此, 研究化解复杂岩溶隧道突水突泥风险的实用技术, 对于保障施工安全、构建和谐铁路建设局面极其必要。

**研究结论:** 通过目前在建的宜万铁路风险隧道风险管理实践, 总结出了化解岩溶隧道突水突泥风险的关键实用技术, 并经实践应用, 证实其行之有效, 对加强未来类似隧道的施工风险控制有较大的借鉴价值。

**关键词:** 化解风险; 复杂岩溶; 控制技术

**中图分类号:** U45 **文献标识码:** A

## Research on the Applicable Technology for Elimination of Water—bursting and Mud—bursting Risks in Construction of Complicated Karst Tunnel

XIE Xian—guang CHEN Guang—xun HUANG De—chuan

(Southwest Research Institute Co., Ltd of CREC, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Research purposes: Yichang—Wanzhou Railway passes through the typical carbonate rock area in west Hubei Province and the total length of karst tunnels is up to 75% of the total railway track length. When the tunnel passes through the soluble rock stratum with lime rock and dolomite rock, the large or extreme large water—bursting and mud—bursting maybe happen because the formation reasons for the rock stratum are very complicated. The water—bursting and mud—bursting can cause huge hazards to construction of tunnel. The large or extreme large accident maybe happen if there is any carelessness in construction. At present, there are no risk control measures for the water—bursting and mud—bursting stipulated in the relative codes for railway tunnel construction and supervision and there is no example to be followed. So it is very urgent to do the research on the applicable technology for eliminating the water—bursting and mud—bursting risks to ensure the tunnel construction safety and establish harmonious railway.

**Research conclusions:** Through application of risk management for construction of risk tunnel on Yichang—Wanzhou Railway, this paper summarizes the key technologies for eliminating water—bursting and mud—bursting risks in construction of karst tunnel. The application shows these technologies are available and have the significance to the risk control of constructing the similar tunnel.

**Key words:** elimination of risk; complicated karst; control technology

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009—07—03

<sup>\*\*</sup> 作者简介: 谢衔光, 1964年出生, 男, 高级工程师。

## 1 工程概况

宜(昌)万(州)铁路是当前在建的全路公认的具有极高施工高风险的铁路项目之一,“施工风险大、科技含量高、建设标准新、环保要求严、建设工期紧”是其显著特点。该项目于2004年6月正式开工建设,此后的2005年1月21日马鹿箐隧道发生大规模突水突泥,一次性夺取了11名工人的生命,震惊中外。

中铁西南院四川铁科管段的监理三标管段座落于湖北省长阳县、巴东县版图,起讫里程为DK 82+500~DK 134+530,全长约52 km。管段内有I级高风险隧道3座,即全线第一长隧野三关隧道(长13 833 km)、八字岭隧道和大支坪隧道)、II级高风险隧道7座(沙坪隧道、堰家坪隧道、红瓦屋隧道、榔坪1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>隧道、高阳寨隧道),其中:I级高风险隧道数量约占全线总量的38%。管段内隧道工程所穿越岩层地质条件极其复杂,岩溶、断层破碎带、高地应力、瓦斯等不良地质广布,隧道施工潜伏着极高风险。因而,监理标段内隧道工程在宜万铁路上占有极为重要的地位,其建设情况直接决定着项目的成败。

笔者于2004年6月—2006年9月和2008年1月至今,两度担任宜万铁路监理三标总监理工程师,两个任期内安全管理受控,未发生一起安全事故。本文通过宜万铁路隧道施工监控管理实践,持续对化解复杂岩溶隧道突水突泥风险的综合控制措施进行了摸索和不断改进尝试,取得了一些有益的经验,这对化解未来类似隧道的施工风险有较大的借鉴价值。

## 2 宜万铁路隧道施工中存在的主要施工风险与特征

经对铁四院出具的设计文件及变更设计图纸的综合分析,罗列出的宜万铁路监理三标管段内3座I级风险隧道(典型复杂岩溶隧道)工程概况及风险特征如下:

(1)八字岭隧道:里程为DK 103+253~DK 109+120,隧道全长5 867 m,隧道为单面坡,最大埋深695 m。隧道区发育有F<sub>1</sub>~F<sub>8</sub>等8条断层和牛鼻子洞、凉水井两条暗河。隧道区岩溶发育深度大,隧道主要位于水平循环带附近,隧道可能发生大规模的突水突泥。特别在向斜核部、牛鼻子洞暗河、凉水井暗河处尤为突出;沿大冶组底部、吴家坪组及栖霞组底部等相对阻水层界面附近和断裂带也是发生突水突泥的重点地段。

(2)野三关隧道:里程为DK 116+203~DK 130+049,隧道全长13 833 m,是宜万铁路第一长隧。纵坡为人工坡,最大埋深695 m。在隧道进口段(DK 116+

203~DK 119+000)、猫儿坪洼地(DK 126+800~DK 127+700段)及隧道出口段(DK 129+000~DK 130+049),特别在隧道出口附近可能遭遇4号暗河,发生大规模涌突水突泥;另外,在断层破碎带(重点为F<sub>12</sub>、F<sub>18</sub>、F<sub>21</sub>、F<sub>22</sub>、F<sub>23</sub>)附近,可溶岩与非可溶岩接触带附近也是涌突水突泥的重点地段。

(3)大支坪隧道:里程为DK 130+142~DK 138+914,全长8 772 m,纵坡人字坡,最大埋深495 m。在进口端(DK 130+142~DK 134+185)隧道洞身主要位于地下水的水平循环带附近,隧道可能遭遇水洞坪管道流及大型岩溶洞穴,发生大规模涌突水突泥的可能性极大,并可能引发地表塌陷。背斜西翼茅口组(H<sub>1m</sub>)长兴组(P<sub>2</sub>)也可能发生大规模的突水突泥,同时可能疏干地表水(如S<sub>4</sub>号泉水),引发环境地质灾害。

以上3座I级风险隧道,均穿越岩溶地质广布地层,施工中可能遭遇的最为严重的主要地质灾害是大型~特大型突水突泥,将对施工安全构成巨大威胁。这些地质灾害极可能发生在大型暗河系统发育段落、富水断层破碎带及向斜轴部挤压带、存在重大物探异常段落等地段。

鉴于宜万铁路地质条件的极端复杂性,偶然因素太多,使得高难度的安全控制与高标准的安全监控目标的矛盾异常尖锐,因而必须对复杂岩溶隧道施工中可能遭遇的突水突泥灾害防范技术进行深入研究。

## 3 规避突水突泥风险的主要监控技术措施

### 3.1 超前地质预测预报及控制技术

#### 3.1.1 地质风险分级与预报技术要点<sup>[1]</sup>

对于各种地质条件下的隧道单个掌子面如何实施地质预测预报,迄今仍无指导性的技术规范可循,尚处于摸索阶段。

宜万铁路参建单位在业主主持下,依据地质勘察结论,将某座隧道的地质风险予以分段落定出地质风险等级,分段策划出具体的预报手段。其中,最高风险隧道有下列4个等级:

(1) A<sup>+</sup>级:可能发生大型~特大型突水突泥及重大物探异常段落。

(2) A级:可能存在较大地质灾害的地段,如可能遭遇大型暗河系统,发育重大软弱、富水、导水性良好的断层。

(3) B级:主要针对可能发生中~小型突水突泥地段。

(4) C级:主要针对岩溶水文地质条件较好的碳

酸盐岩及碎屑岩地段, 发生突水突泥的可能性较小。

经参建四方研究, 所形成有关各种地质等级的超前预报手段的一般组合情况如表 1 所示。

表 1 不同地质风险等级的超前预报手段组合一览表

序号	地质风险 分级	组合预报手段
1	A <sup>+</sup>	TSP203 HSP 地质雷达, 地质素描, 超前地质钻孔 3~7 个, 超长炮孔 8~17 个。存在异常时, 加密钻探
2	A	TSP203 HSP 地质雷达, 地质素描, 超前地质钻孔 1~3 个, 超长炮孔 5~8 个。存在异常时, 加密钻探
3	B	TSP203 HSP 地质雷达, 地质素描, 超前地质钻孔 1 个, 超长炮孔 5 个。存在异常时, 按 A 级要求执行
4	C	TSP203 HSP 地质雷达, 地质素描

3.1.2 抓好地质预报监控的创新措施

对于这一新生工序的控制, 目前尚无监控先例可

表 2 高风险隧道开挖许可审批表  
编号: 四川铁科(合同段号)(年份)(顺序号)

申请单位及理由(1)	我部根据_____隧道设计文件、(施地)(2008)第_____号地质通知单、地质实施细则等文件要求, 在_____隧道_____DK_____+_____掌子面_____ (部位) 业已实施下列预报手段: _____  且其书面结果已得到监理工程师签字确认。 在对上述手段探测结果分析后, 综合判释结论已确认无异常, 并得到工地设计组认可( ); 或本掌子面超前地质预测预报手段施作完毕, 发现异常, 但处理效果已达到设计要求。( ) 超长炮孔数量、孔深、角度、孔位布置见附件。 现申请实施开挖作业, 请予审批! 施工单位值班负责人: _____ 年 月 日 时 分
现场监理工程师 检查结论(2)	经检查确认, _____标段_____隧道_____DK_____+_____掌子面_____ (部位) 所实施的上述地质预测预报手段真实、可靠, 其书面结果已得到监理工程师确认, 且综合判释结论已确认无异常( ) 或本掌子面上述超前地质预测预报手段发现异常, 且处理效果满足设计要求。( ) 超长炮孔数量、孔深、角度、孔位布置与现场实际和自检资料相符, 决定同意: _____DK_____+_____掌子面_____ (部位) 开挖申请。 (此资料必须报分站长备案检查) 现场监理工程师: _____ 年 月 日 时 分
施工单位签收人:	_____ 年 月 日 时 分

满足确认项目(√)本表一式两份, 施工、监理各一份

(3) 建立实施地质预报的高压线。实行预报一票否决制, 严禁未经监理批准、擅自无序开挖。

施工实践证明, 超前地质预测预报已在 I 级风险隧道风险防范中的发挥龙头作用, 而中铁西南院四川铁科建设监理公司宜万铁路监理站创建的上述管理制度和控制程序, 是将地质预报切实纳入工序的有效步骤。经在该公司管段的大支坪隧道、野三关隧道等 2 座 I 级风险隧道中试用, 取得了突出效果, 具备推广价值。

借鉴, 也无施工规范或监理规范可遵循, 不少监理单位均在积极摸索, 革新管理办法, 不断提升地质预报监理质量。譬如: 四川铁科建设监理公司宜万铁路监理站创立的《高风险隧道开挖许可审批制度》(审批表如表 2 所示), 便是一种有益的尝试。

该制度明确规定:

- (1) 监理人员必须对物探(如地质雷达、TSP 红外探水等)实行见证控制; 对超前地质钻探和超长炮孔予以全程旁站监控, 并同步做好监理记录, 作为隧道开挖的依据。
- (2) 要求施工单位必须按表 2 规定程序, 事先填报《高风险隧道开挖许可审批表》报现场监理工程师审批和书面签名同意、监理分站长抽查备案后方可开挖。对于现场工程师审批或监理分站长备案抽查认为不达标, 施工单位必须立即将监理检查、复查中指出的问题全面落实到位, 并重新报批后方可开挖。

3.2 关键性防突实用技术

3.2.1 严格执行“探水超前”原则<sup>[2-3]</sup>

要探明隧道掌子面前方地层富水状况, 就必须切实做好超前地质预测预报, 将超前地质预报纳入必备工序, 严格管理。未实施超前地质预报的段落, 禁止掘进。为此, 持之以恒的全过程督促施工方严格按《施工地质超前预测预报设计》规定, 切实做好超前地质预测预报, 切实发挥地质预报在防范高风险的龙头作用, 对于化解突水突泥灾害不可或缺。

在宜万铁路,对于设计划定的风险最高的 A<sup>+</sup>、A 级地段,要求采用红外探水、地质雷达、TSP、HSP 等物探手段与地质素描、平行导坑超前探测和 30 m 深孔水平地质钻探相结合的综合手段开展预报,尽可能地摸清掌子面前方围岩条件。通过开展综合地质预报和及时采取的预防措施,不仅在施工中多次化解了 15 标和 16 标野三关隧道、16 标大支坪隧道和 13 标八字岭隧道 3 座 I 级风险隧道的突水突泥灾害。同时,在此类复杂岩溶隧道地质超前预报的监控管理实践中也得到如下启示:

(1) 经对超前地质预测预报物探成果与实际隧道开挖结果的多次核对、比较,发现物探手段在断层破碎带、软弱夹层、岩性突变等诸方面的预报结果的准确性相当高,而对地层富水状况的预报结果则有较强的偏差。因而,实施水平超前钻探仍是目前探测地层富水状况的最为有效的手段。

(2) 除深孔超前钻探外,在开挖掌子面上增加 5~6 m 的超长炮眼加密探测,对于进一步探明掌子面前方地层富水状况极为有益。

(3) 平行导坑超前探测结果只能供正洞参考,绝对不能将平导同一里程的地质揭示结果照搬至正洞,否则将带来极高施工风险。此观点在宜万铁路 16 标大支坪隧道进口段施工中得到了充分展示。

(4) 在异常地段或地质复杂地段开挖前,仅实施设计规定钻孔可能难以满足施工控制需求。当实施完设计规定孔位的孔数后,仍不能判明掌子面前方地层富水情况的,必须采用超长炮孔加密钻探直至探明为止。盲目开挖则可能带来灾难性后果,此种情形在宜万铁路大支坪隧道施工中已得到体现。

(5) 不能只关注长隧道、特长隧道,中、短隧道的超前地质预测预报也十分重要,榔坪 2<sup>号</sup>隧道的施工实践(隧道穿越大型岩溶填充体时发生塌方)已充分证实了此点。

(6) 无论是施工方还是监理方,均应指派专人开展地质预报,专人管理和关注台账,始终保持 5~10 m 长的预报搭接长度,以防工作疏忽导致漏报铸成大错。

### 3.2.2 严格贯彻“有水处治在前、开挖在后”的原则<sup>[4-5]</sup>

在超前地质预报显示掌子面前方可能富水时,首先要采用合理的处理方式进行处理,但原则上不得堵塞暗河,以防区域地下水枯竭。就一般情况而言,受国家环保法规对工程建设环保的要求制约,同时也是基于安全管理、工期控制的需要,隧道施工执行“以堵为主、限量排放”的方略,符合时代要求。宜万铁路岩溶隧道的防突实践揭示:

(1) 对于富水地层,紧密结合超前地质预测预报结果,抓好防突水突泥的预处理技术措施落实和效果检验两个环节至关重要,没有实现预期堵水处治效果的部位不得开挖。

(2) 合理的深孔长背注浆堵水方案仍是目前最有效的防突举措。

(3) 必须预留合理的开挖搭接段。施工中要密切关注掘进进程,注意下次开挖部位与本次防突预处理段终止里程保持 5~10 m 厚的抵抗岩柱,以确保施工安全。

综上所述,四川铁科建设监理公司宜万铁路监理站创建的岩溶隧道超前地质预测预报和开挖两大工序的控制流程,如图 1 所示。

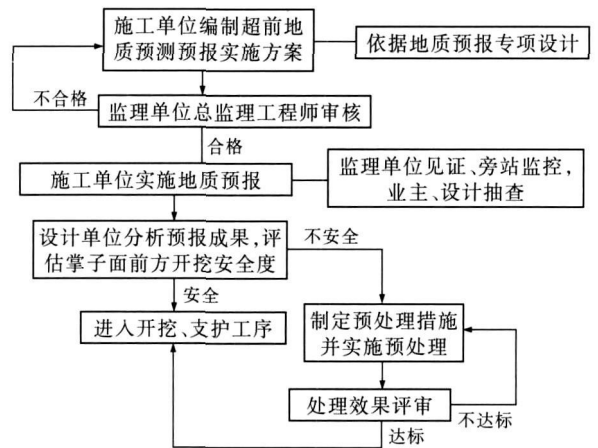


图 1 岩溶隧道地质预报和开挖两大工序控制流程图

## 4 化解风险的配套技术措施

### 4.1 风险减轻对策<sup>[6]</sup>

从风险管理理论角度上讲,在实施风险减轻策略时,最好的办法是将项目的多种风险减轻到可接受的水平。具体的风险减轻了,整个项目失败的概率就自然减少,成功的概率就随之递增。

图 2 诠释了风险事件失败概率减少与成功的概率递增的一般关系。

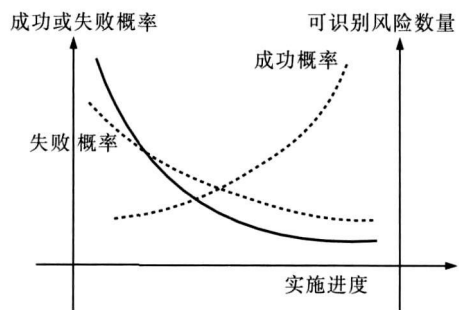


图 2 项目风险事件减轻策略功能图

就宜万铁路而言, 及时建立的《宜万铁路建设防范高风险八个专项机制》是实施风险减轻策略的重大步骤。各参建单位皆建立了对应的实施方案, 并不断改进。机制发挥的功用主要有:

(1) 对可以合理预见的施工风险, 诸如: 全线 8 座 I 级风险隧道和 26 座 II 级风险隧道地勘定以及各隧道各施工段的风险分级的明确等, 皆是对整个项目施工风险的预测。同时明确了预防措施的落实标准, 有效地规范了安全管理行为, 降低了风险概率。

(2) 对于施工中存在的管理缺陷、安全隐患, 如: 明确专职安全员配置制度、实行风险分级督办制度等, 都从制度上明确了处治要求, 避免隐患转化为事故。

(3) 通过不断完善应急预案机制和安全警戒措施, 对因认知水平限制和不可抗力在内的种种致因酿成的事故, 能够作出快速反应, 多次避免灾害继续扩大或演化二次灾害, 有效地保护了参建人员生命安全和最大限度地减轻了施工机具等的财产损失。

## 4.2 风险转移策略

(1) 全面熟悉《建设工程施工合同》文件, 及时督促施工方按《建设工程施工合同》规定办理工程保险, 避免脱保。在发生灾害后, 又及时敦促施工方案按《保险合同》理赔, 避免理赔超限。

(2) 按国务院颁发的《建设工程安全生产管理条例》规定, 及时督促施工单位为从事隧道作业和管理的人员办理人身意外伤害保险。监理单位同步为隧道监理人员购置人身意外伤害保险。在发生伤害后, 又及时协调按《保险合同》理赔, 避免理赔超限。

## 5 结论

宜万铁路复杂岩溶隧道的施工历程表明, 突水突泥危害是施工中遭遇的最为严重的地质灾害, 毁坏力巨大, 曾给项目参建人员的生命安全构成了严重威胁, 对隧道施工带来了严重阻碍, 但迄今并无技术规范可遵循。参建单位经过长期探索, 总结出了以上风险综合控制技术措施。经在宜万铁路监理三标 (2004 年 6 月—2006 年 9 月和 2008 年 1 月至今) 的 3 座 I 级风险隧道施工管理中运用, 证实其对于抓好化解岩溶隧道突水突泥风险发挥了重要的作用。这不仅对未来类似隧道工程的施工安全监理有较强的借鉴价值, 更对构建和谐铁路建设局面有着十分重要的政治意义。

## 参考文献:

- [1] 刘志刚, 赵勇. 隧道隧洞施工地质技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001
- [2] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册·隧道 (修订版) [K]. 成都: 铁道部第二勘测设计院, 1999
- [3] 黄成光. 公路隧道施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 关宝树. 隧道工程施工要点集 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [5] 中国交通建设监理协会. 交通建设工程安全监理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 程爱学, 徐文峰. 项目总监 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005
- [7] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008 27(7): 1297—1306
- [8] 张庆欣, 王晓燕, 齐岳山. 高风险隧道施工技术 [J]. 铁道工程学报, 2008(3): 68—72
- [9] 胡子平. 复杂岩溶隧道突水突泥防灾报警系统设计 [J]. 现代隧道技术, 2007(6): 48—69
- [10] 吕乔森, 罗学东, 任浩. 综合超前地质预报技术在穿河隧道中的应用 [J]. 隧道建设, 2009(2): 48—69
- [11] 王全胜. 长大隧道施工防治水技术及应用 [J]. 铁道部工程设计鉴定中心, 中国铁道学会, 铁路客运专线建设技术交流会论文集. 武汉: 长江出版社, 2005 348—352
- [2] 谭忠盛. 琼州海峡铁路隧道可行性研究探讨 [J]. 岩土工程学报, 2004 23(2): 139—143
- [3] 张明聚, 郜新军, 郭衍敬. 海底隧道突水分析及其在翔安隧道中的应用 [J]. 北京工业大学学报, 2007 33(3): 273—276
- [4] 崔玖江. 隧道与地下工程施工技术现状及问题对策 [J]. 施工技术, 2004 30(1): 3—6
- [5] 徐海廷, 王全胜, 孙国庆, 等. 厦门翔安海底隧道土石交界软弱地层全断面注浆试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2009(1): 67—71.
- [6] 据建明. 超前地质预报技术在海底隧道施工中的应用 [J]. 铁道工程学报, 2007(7): 76—80

(上接第 68 页)