

非可溶岩隧道突涌灾害预测研究及工程应用

陈礼彪^{1, 2}, 刘泉声¹, 张国华³, 张晓炜⁴

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 福建省高速公路建设总指挥部, 福建 福州 350001;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 河南省交通规划勘察设计院, 河南 郑州 450052)

摘要: 隧道等地下工程施工过程中, 突涌事故一般发生在可溶岩隧道中, 然而近些年非可溶岩隧道发生突涌事故的案例越来越多, 给隧道施工带来重大灾难和经济损失。首先, 通过 3 个突涌事故案例的剖析, 揭示非可溶岩隧道突涌的本质是开挖或爆破扰动触发赋存在破碎带或软弱带中的水和碎屑物在自身压力作用下涌入隧道, 其孕险环境必须同时具备物质条件、空间条件和触发条件, 三者缺一不可。物质条件是充足的水和砾石、砂、泥等原地性或外源性的碎屑物; 空间条件是突涌物的存储和运移的破碎带或软弱带等; 触发条件是岩体的开挖扰动和爆破扰动。非可溶岩隧道施工过程中突涌灾害的预测就是对掌子面前方能够赋存潜在突涌物的破碎带或软弱带及其带内物质组成、固结程度的辨识。然后, 针对突涌灾害的物质和空间条件给出基于地质、物探和钻探的综合超前预报体系; 结合实践, 重点建立地震波反射法(TGP)成果中的反射幅度比、波轴相似度等参数对异常地质体的地震动态响应特征。最后, 将上述成果应用到岩前隧道的 F17 断层破碎带的预报中, 通过宏观工程地质分析和已开挖段的地质调查及试验, 全程动态追踪隧道揭露围岩的统计及力学特征; 通过未开挖段长距离的 TGP 探测和短距离的地质雷达和水平钻孔探测, 辨识隧道即将揭露区段突涌灾害的孕险环境, 实现对断层破碎带位置、规模、空间展布的精确定位, 对带内物质组成及胶结程度的确认, 成功预测突涌事故的发生。实践证明, 上述综合预报技术体系能够预测非可溶岩隧道的突涌灾害, 其结果准确可靠, 可为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: 隧道工程; 非可溶岩; 突涌灾害; 超前地质预报

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2014)04 - 0786 - 11

PREDICTION OF INRUSH DISASTER IN NON-SOLUBLE ROCK TUNNEL AND ITS ENGINEERING APPLICATION

CHEN Libiao^{1, 2}, LIU Quansheng¹, ZHANG Guahua³, ZHANG Xiaowei⁴

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. Fujian Provincial Expressway Construction Directorate, Fuzhou, Fujian 350001, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 4. Henan Provincial Communications Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Henan, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Inrush accidents generally happen in soluble rock tunnels during underground constructions. However, the number of inrush disasters reported in non-soluble rock tunnels have been increasing recently. They can lead to serious disasters and huge economic losses in tunnel construction. Cases studies were thus carried out and the analysis of three inrush accidents revealed that the causes of the inrush in non-soluble rock tunnels were due to the effects of excavation and blasting disturbance leading to the water and fragmental materials occurred in the fractured and weak zones flowing into the tunnels under their own pressures. The risks carrying environment must

收稿日期: 2013 - 10 - 31; **修回日期:** 2013 - 11 - 29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41202227)

作者简介: 陈礼彪(1967 -), 男, 1992 年毕业于福州大学结构工程专业, 现为博士研究生, 主要从事高速公路建设管理及隧道工程方面的研究工作。
E-mail: clbfj@sina.com

have the required physical, spatial and triggering conditions simultaneously: the physical conditions refers to the existence of abundant water and in-situ or exogenous fragments including gravel, sand and mud, etc.; the spatial condition refers to the fracture zone and the weak zone storing and transferring the intruding materials; The triggering condition is the disturbance to the rock caused by excavation and blasting during the tunnel construction. The predication of inrush disaster in the construction of non-soluble rock tunnels is therefore to identify the fracture and weak zones containing the potential intruding materials and the components and cementation level of material in two zones a head of the front face of tunneling. A comprehensive geological and geophysical detection and drilling scheme was then carried out to according to the material and spatial conditions in inrush disaster; The characteristics of seismic dynamic response of the parameters such as the reflection amplitude ratio and the wave axis similarity to anomaly geological objects in tunnel geologic prediction(TGP) were constructed. The approach was applied to the fault fracture zone F17 in anterior tunnels. The macro engineering geological analysis, geological investigation and experiments in excavated sections and the trends tracking were performed to reveal the statistical and mechanical characteristics of the surrounding rocks. The long range TGP and the short range ground penetration radar detections and the horizontal drilling were performed to identify the risks containing environment of intruding disaster in the section unexcavated. The precise locating of the position, the scale and the spatial distribution of the fault fracture zone were thus be achieved. The material components within the zones and the cementation level were detected and the occurrences of inrush accidents were predicted successfully.

Key words: tunnelling engineering; non-soluble rock; inrush disaster; advanced geological prediction

1 引言

修建于易溶岩(石灰岩、白云岩和石膏等)地区的隧道工程, 由于其独特的岩溶作用, 岩层中发育大量的含导水构造并赋存岩溶水体, 隧道开挖不可避免地扰动或揭穿隔水结构, 诱发突涌(突泥、涌水)以及塌方等大型地质灾害, 诸如泉三高速的三阳隧道、赣龙铁路的象山隧道, 宜万铁路的野三关隧道和京广线大瑶山隧道, 均发生过大型突涌施工, 造成严重的工程损失和人员伤亡^[1-6]。然而, 发生在非可溶地区的突涌事故却少有报道, 与易溶岩地区的突涌事故相比, 非可溶岩隧道的突涌事故主要发生在构造破碎带、风化深槽和不同岩性地层的接触带上^[7-9]。其典型案例如台湾 12.9 km 长的雪山隧道, 隧道穿越复杂地质条件, 施工中遇到数条断层和构造破碎带, 超前导洞和主洞施工过程中先后分别发生 42 和 48 次突泥涌水, 致使施工周期延长 15 a^[10]。同时, 非可溶岩隧道在突涌物质的构成方面也较易溶岩石有很大差别, 非可溶岩地区的突涌物中碎石、砂砾等固体成分较多, 而液体的水含量较小, 且固体中的细颗粒的泥砂含量普遍较高。非可溶岩地区发生的突涌事故具有突发性更强, 准确部位难以判定, 规模和动力特征难以预测, 破坏力大, 危害大等显著特点。同时, 这类突涌灾害往往造成围岩失稳,

隧道堵塞, 设备淹埋, 隧道报废或人身伤亡事故, 使工程建设遭受严重损失。

鉴于目前隧道突涌灾害的研究主要集中在易溶岩领域, 而非可溶岩地区的突涌灾害缺乏深入系统的研究, 因此, 开展非可溶岩隧道突涌灾害的预测研究, 特别是借助于已发生类似突涌事故预测预报经验开展的研究具有重要意义, 此项研究可对今后类似工程提供参考和借鉴。

2 典型突涌案例及孕险环境分析

2.1 石林隧道

2.1.1 工程及地质概况

石林隧道位于永宁高速公路的永安段, 距永安市区约 8 000 m, 隧道长 2 865 m, 最大开挖断面约 110 m², 最大埋深为 320 m; 石林隧道为双洞分离式结构, 洞口段浅埋, 采用钻爆法开挖。

隧址区属构造侵蚀中低山地貌, 地形呈波状起伏, 高差较大, 切割较深。地表有明显冲沟, 有山间小溪流经, 常年有水, 溪水量不大, 接收大气降水补给随季节变化。石林隧道从进口到出口依次通过泥质粉砂岩、粉砂岩夹页岩, 石英砂岩、石英砂砾岩、变质砂岩和千枚状粉砂岩。洞口段岩体为全~强风化, 呈砂土状-碎块状; 洞身段为中~微

风化，岩体较坚硬，较完整。砂岩的颜色以灰色、白色为主，偶有黑色，主要由石英、黏土等矿物组成，颗粒细小。砂岩中偶有页岩和板岩的夹层，夹层的厚度范围为 0.04~0.70 m。

隧址位于李坊—魏坊倒转背斜西南翼，受多次构造运动影响，区内有 3 条断层与隧道大角度相交，分别是 F1, F2 和 F3，宽度为 25~290 m。F1 为压性正断层，断层带内岩体松散、破碎，砂岩的泥化、砂化现象严重，富含地下水。F2 和 F3 为逆断层，带内岩体为石英砂岩和石英砂砾岩，岩体较完整。隧址区域富含地下水，水位高于隧道顶板。石林隧道地质纵断面地质如图 1 所示。

2.1.2 突涌灾害描述

石林隧道施工过程中，突涌事故统计如表 1 所示。

典型的灾害事故描述如下：

2010 年 4 月 19 日，在右洞施工至 YK14+184 处时，拱部及右侧边墙初期支护开裂变形，侵入二衬净空，同时从裂隙中有泥、砂流出，流出量约 120 m³。在采取释能降压、全断面帷幕注浆的过程中，2010 年 5 月 12 日 14 点，泥、砂瞬间涌出，突涌量约 1 500 m³，涌出物堵塞整个隧道，巨大推力将施工台架向外推出约 30 m，并且严重变形，此次突涌事故的发生具有明显的滞后性，为缓发性突涌灾害。其事故照片如图 2 所示。

2010 年 7 月 10 日凌晨，在左洞开挖至 ZK14+208 处时，拱脚及侧壁导坑顶部初期支护被压垮，有少量泥砂涌出。30 min 后约 1 200 m³ 流砂瞬间涌出，堵塞侧壁导洞，将小型施工台架破坏并全部掩埋，涌砂的流摊长度达 50 m。其照片如图 3 所示。

2.2 石鼓山隧道

2.2.1 工程及地质概况

石鼓山隧道是福建南安金淘至厦门高速公路上

的双洞六车道隧道，全长 6 005 m，最大开挖断面约 170 m²，最大埋深约 500 m。隧道处于构造剥蚀微丘地貌，地形呈波状起伏，沟壑较多，植被发育。

隧道场区地质构造主要受区域性 NE 向长乐—诏安断裂带和 NW 向永安—晋江构造带的控制，未见活动性构造通过，但次级断裂构造广泛发育。隧道区主要发育 NNW 向和 NW 向的次级构造，受其影响岩体内节理裂隙发育。2 个次级断裂构造在突涌区域交汇，是影响隧道围岩稳定性的主要因素。洞身围岩为侏罗系南园组凝灰熔岩及其风化层、局部凝灰熔岩中夹薄层砂质泥岩、粉砂岩。洞体 II、III 级围岩级别约占全隧道 2/3。隧道区地下水主要为风化岩中的孔隙水和构造裂隙水，其中节理裂隙带和断层构造带是地下水渗流的主要通道。

2.2.2 突涌灾害描述

石鼓山隧道右洞开挖至 YK12+198 时，掌子面右侧拱腰处突然大量出水，在导水、喷护应急处置作业期间，2 d 内 2 次引发大规模突涌事故。第一次是掌子面右侧拱腰处突然发生垮塌，并伴随着大量水、泥涌出。第一次的涌出物以细颗粒的泥和砂为主，涌出物约 8 000 m³，历时约 5 min，形成高达 3 m、长约 45 m、宽及全隧的泥、砂堆积体。此后，突涌点的出水量维持在 2 000 m³/h，第一次突涌后其堆积体的状态照片如图 4 所示。

18 h 后发生第二次突涌，涌出物以泥和石块为主，瞬间突涌量达到 4 500 m³，堆积体平均高度达 5.8 m，宽及全隧，长度约 55 m，涌出石块最大尺寸为 1.5~2.0 m。此后，突涌点出水量维持在 1 150 m³/h。其突涌堆积体照片如图 5 所示。

2.3 灯火寨隧道

2.3.1 工程及地质概况

灯火寨隧道是福建省在建厦门(海沧)至漳州(天宝)

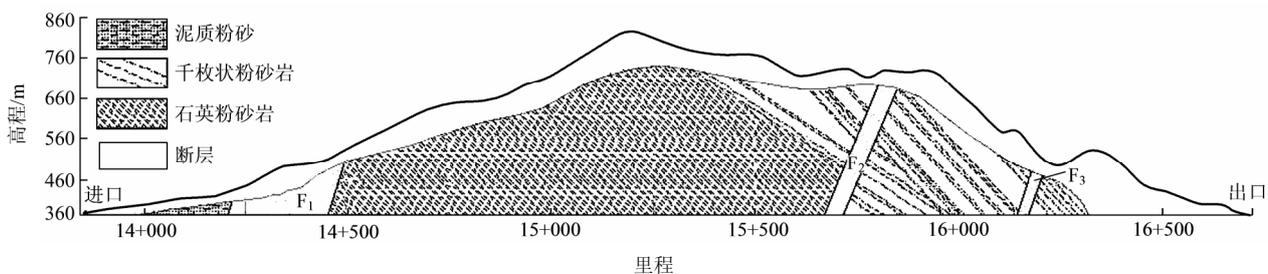


图 1 石林隧道纵断面地质图

Fig.1 Longitudinal section geological graph of Shilin tunnel

表 1 石林隧道突涌事故统计表

Table 1 Statistics of disasters of inrush mud and sand gushing

序号	里程	类型	灾害性质
1	YK14+175~191	突泥涌砂并伴随塌方	缓发性
2	YK14+194~205	突泥、涌砂	缓发性
3	YK14+260~267	突泥、涌砂	突发性
4	YK14+393~425	突泥、涌砂	阵发性
5	ZK14+210~220	突泥、涌砂	突发性
6	ZK14+370~382	突泥、涌砂	阵发性



图 2 石林隧道突涌灾害照片

Fig.2 Picture of inrush disaster of Shilin tunnel

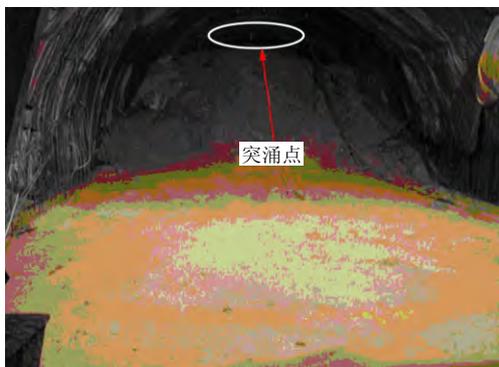


图 3 石林隧道涌砂照片

Fig.3 Picture of inrush sand of Shilin tunnel



图 4 石鼓山隧道第一次后突涌照片

Fig.4 Picture after first inrush of Shigushan tunnel

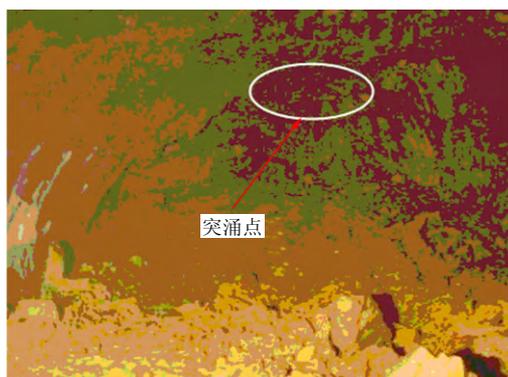


图 5 石鼓山隧道第二次突涌后照片

Fig.5 Pictures after second inrush of Shigushan tunnel

高速公路上的双洞六车道隧道，左线全长 3 372 m，右线全长 3 390 m，最大开挖断面约 170 m²，宽 17.5 m、净高 8 m，为双洞大跨径隧道。隧址区岩层属南园组凝灰岩(J_{3n})及燕山期侵入花岗岩(γ₅₃)，表层覆盖有残坡积成因的黏性土，厚度不大。隧道区共发育有 5 条断裂构造或节理裂隙密集带。隧址地下水类型为覆盖层孔隙水、风化带裂隙水和构造裂隙水，地下水发育，其补给来源为大气降水。隧道 IV~V 级围岩及构造破碎带、节理裂隙密集带的路段较长，其富水性、导水性好，对隧道施工影响较大。

2.3.2 突涌灾害描述

灯火寨隧道的进口段先后发生 3 次突涌事故。第一次发生在 2012 年 5 月 7 日，当右洞掌子面 YK22+136 的上台阶爆破开挖后，掌子面揭示的围岩为砂土状全风化花岗岩，富含地下水，岩体松散，强度极低，手掰即碎，水侵的岩体呈塑性。在初喷作业时，上断面左侧拱腰突然出现突泥事故，突泥体呈流砂状涌出，突泥量约 450 m³。其突涌后堆积体照片如图 6 所示。

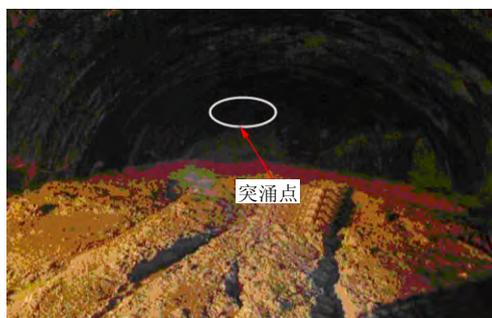


图 6 灯火寨隧道第一次突涌后照片

Fig.6 Picture after first inrush of Denghuozhai tunnel

第二次突涌事故发生在 2012 年 5 月 8 日上午 9

点，右洞掌子面 YK22+136 的上断面左侧拱腰部位再次发生突泥，突泥体呈流砂状，瞬间涌出，将中台阶作业的挖掘机和其后方的开挖作业台架推出 15 m，突涌物将整个上、台阶和中台阶淹没，瞬间突泥量约 1 800 m³。本次事故造成上台阶约 11 m 的初支发生垮塌，中台阶支护发生显著变形(约 30 m)，正在施工作业的一台挖掘机被淹没至驾驶室，中台阶存放的开挖设备全部被掩埋。其突涌堆的照片如图 7 所示。

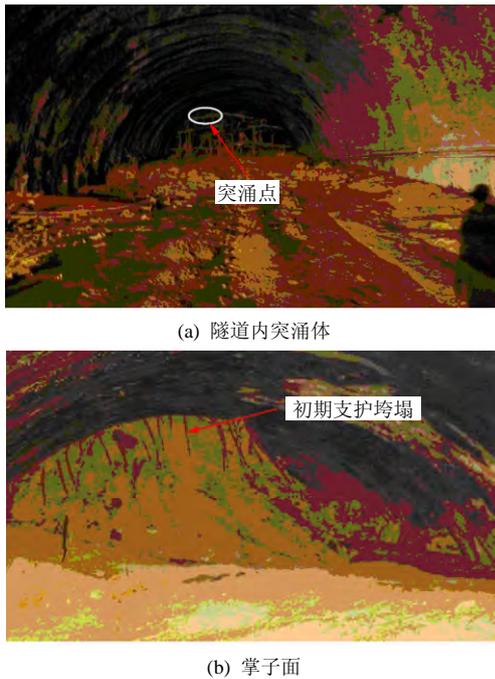


图 7 灯火寨隧道第二次突涌后照片

Fig.7 Pictures after second inrush of Denghuozhai tunnel

第三次突涌事故发生在 2012 年 5 月 13 日晚 11 点，当时右洞掌子面正在进行回填作业，突然掌子面前方发出强烈的坍塌声，紧接着有泥砂瞬间涌出，突涌量约 24 000 m³。突涌的泥砂淹没至二衬台车前，将 160 m 的隧道完全堵塞。巨大的推力将支护台架向洞口推移约 100 m 与防水板台架挤在一起，二衬台车被推移脱轨，同时，造成多套施工设备被掩埋。本次突涌事故造成隧道洞顶约 175 m 高的地表出现一个直径约 26 m，深度约 15 m 的塌坑。其突涌堆积体及地表塌坑的照片如图 8 所示。

2.4 孕险环境

上述突涌事故在笔者这些隧道及地下工程的专业技术人员的心里留下了深深的烙印，也使笔者充分认识到在隧道及地下工程建设中面临的巨大挑战，一系列的问题需要去深思、研究。非可溶岩隧道中为什么会发生这些事故？如何发生的？为什么



(a) 隧道内照片



(b) 隧道上方地表照片

图 8 灯火寨隧道第三次突涌后照片

Fig.8 Pictures after third inrush of Denghuozhai tunnel

相同事故在同一隧道中接连发生？第一次事故发生后，能得到什么启示？采取哪些措施来预测事故的发生？采取哪些措施能避免事故的发生？所有这些问题的回答都需要建立在对灾害孕险环境和机制的正确认识上。

通过以上 3 个突涌事故案例的剖析，揭示非可溶岩隧道突涌的本质是开挖或爆破扰动触发赋存在破碎带或软弱带中的水和碎屑物在自身压力作用下涌入隧道。隧道类似突涌事故的发生需同时具备物质条件、空间条件和触发条件，三者缺一不可。其中的物质条件是充足的水和砾石、砂、泥等碎屑物。水不仅是突涌灾害的重要物质组成，还是突涌灾害中碎屑物的主要搬运介质和诱因之一。固态的突涌物从来源上可分为外源性物质和原地性物质两大类。其中，外源性物质主要是附近风化的岩石和搬运产物，是岩石碎屑和石英、云母等矿物碎屑通过各种渠道，由水和风等营力搬运到低洼的地带或隐伏的构造中赋存下来，呈松散的堆积体，构成水砂混合物的物质来源，其物质成分与隧道围岩大多不一样，并且具有一定的分选型和磨圆性。原地性物质是原地岩石的风化产物，其物质组成、特征与原岩的岩性及其风化程度密切相关，全、强风化的岩体，其碎屑物以砂、泥为主，风化程度较轻的碎屑物中，泥、砂含量较少，砾石含量多。

隧道突涌事故发生所需具备的空间条件是指突

涌物的存储空间和运移的通道空间。非可溶岩中的存储空间和通道条件一般都由断层破碎带、软弱夹层和风化深槽等演化而来, 同时受到岩性、褶皱、原生结构面、风化、蚀变等多因素影响。突涌物的存储空间和运移通道的规模和性质等条件直接控制隧道突涌事故的规模、特征和危害程度, 对于存储空间大和运移通道顺畅的地段, 一般易于引发危害性大的突发性事故。对于直接穿越富水松散堆积体的隧道, 因其整个隧道空间直接置于其中, 在空间条件上是个特例。

触发条件是指隧道开挖及爆破振动造成围岩的扰动、损伤, 改变了潜在突涌物的赋存环境, 打破原有力学平衡, 使突涌物在自身压力作用下, 沿着通道涌出。主要的触发条件包括: 开挖工艺、支护参数和爆破振动等。隧道突涌灾害孕险环境统计如表 2 所示。

3 突涌灾害预测

隧道工程深埋地下, 区域工程地质和水文地质条件复杂、多变, 因此期望在勘测设计阶段完全查明隧道穿越区域的地质条件、岩体的状态和特性, 特别是不良地质体的确切位置、规模等是十分困难的, 也是不切实际的^[11-14]。而对可能发生突涌事故的潜在隧道段, 较准确地超前定位前方隐伏的断层破碎带、节理裂隙密集带和富水带等不良地质体, 评判其位置、规模及空间展布, 又显得十分重要。

3.1 综合预报体系

非可溶岩隧道的超前地质预报运用地质与物探相结合、地面与地下相结合、长距离与短距离相结合, 合理搭配, 贯穿全程的综合预报技术; 其综合超前地质预报技术体系如图 9 所示。

工程地质分析是根据隧道地形地貌、区域地质构造、补充地质调查和已有的勘测设计资料, 通过地层层序对比、地层分界线及构造线的地下和地表相关性分析, 断层要素与隧道几何参数的相关性分析等, 利用常规地质理论、地质作图和趋势分析等方法, 推测隧道可能揭示的地质情况。隧道施工过程中, 对已开挖的隧道段, 开展掌子面和侧壁围岩的岩性、产状、层间结合程度等的详细地质调查; 同时, 对岩体中发育的节理、裂隙根据其产状特征进行统计归类, 分析其对自身围岩稳定性的影响及未开挖段中的延展情况; 描述已揭露的褶皱、断层特征, 根据地层层序、分界线和构造线的相关性分析来推断其在未开挖隧道中的延展特征。同时在典型的隧道围岩上开展岩体声波波速和点载荷强度试验, 获取岩体基本物理力学参数, 为物探方法预测隧道前方未开挖段的地质情况提供基础数据。对未开挖的隧道段, 采用 TGP 进行全覆盖的长距离超前探测, 结合前述的地质调查和试验, 在宏观上掌握掌子面前方大范围的、初步的地质情况, 圈定需要重点跟踪排查的地质异常带。对 TGP 探测发现的地质异常带, 用地质雷达进行短距离的跟踪排查, 对潜在的不良地质体, 辅以超前水平钻探或加深炮孔

表 2 隧道突涌灾害孕险环境统计表

Table 2 Statistics of pregnancy environment for inrush disasters of tunnels

条件	物质条件	空间条件	触发条件
石林隧道	地势较低, 地表有水田, 常年有水; 潜在的突涌物为碎石土, 是原岩碎裂和风化后的产物, 属原地性突涌物, 碎石主要为泥质粉砂岩、石英砂岩、变质砂岩, 其粒径为 5~15 cm, 碎屑物呈棱角形, 碎屑颗粒含量约占总重的 53%, 排列混乱, 大部分不接触; 碎屑颗粒间被砂土填充, 整体结构松散, 手掰即脱落, 锹可挖, 易坍塌。富含地下水	隧址位于李坊—魏坊倒转背斜西南翼, 受多次构造运动影响区内有 3 条断层与隧道大角度相交, 宽度为 25~290 m。破碎带内直接充填上述描述的碎石土	隧道开挖
石鼓山隧道	地势较平缓, 地表为旱田, 季节性有水。潜在的突涌物为凝灰熔岩全风化后的产物, 属原地性突涌物, 岩石完全风化为砂和土, 原状结构和外貌消失, 其中砂主要为原岩风化后的石英颗粒, 其粒径为 0.3~0.8 cm, 颗粒含量约占总重的 45%; 石英颗粒间被黏土填充, 整体结构较松散, 手掰即脱落, 锹可挖, 易坍塌。富含地下水	隧道场区发育 NNE 向和 NW 向的次级构造, 岩体节理裂隙发育。2 个次级断裂构造在突涌区域交汇, 内部充填上述描述的全风化石碎屑物。隧道开挖直接揭示此破碎带, 构成碎屑物突涌通道	隧道开挖及爆破振动
灯山寨隧道	三面环山, 对应的突涌点位于最低点, 相对高差约 350 m, 是地表水和地下水的汇集点。潜在的突涌物为花岗岩全风化后的产物, 属原地性突涌物, 岩石完全风化为砂和土, 原状结构和外貌完全消失, 其中砂主要为原岩风化后的石英颗粒, 其粒径为 0.3~1.0 cm, 颗粒含量约占总重的 45%~53%; 颗粒间被黏土和高岭土填充, 手搓有明显的滑腻感, 整体结构较松散, 手掰即脱落, 锹可挖, 易坍塌。富含地下水	隧址区域发育 5 条与隧道轴线大角度相交的断裂破碎带, 区内经历多期构造运动及岩浆侵入。其中, 燕山期花岗岩沿着破碎带侵入侏罗纪的凝灰岩中对隧道的影响最大, 处于侵入边缘接触带的岩体遭受热液蚀变作用, 坚硬的花岗岩被云英岩化、高岭土化, 加之后期强烈的风化作用, 变成软弱蚀变带。带内岩体发育上述描述的碎屑物	隧道开挖及爆破振动

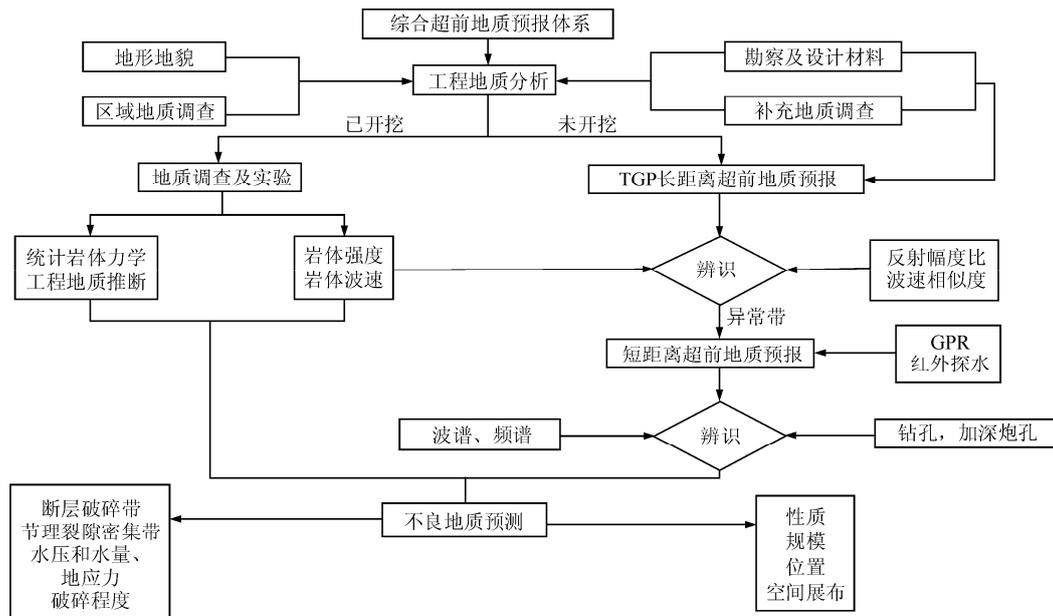


图9 综合超前地质预报技术体系

Fig.9 Comprehensive advanced geological forecast system

精确判断其性质、规模、位置及空间展布。

3.2 TGP 成果的深入解释

3.2.1 工作原理及基本概念

TGP 隧道地质超前预报系统由北京水电物探院刘云祯教授研制，是地震反射波及绕射波原理在隧道超前地质预报中的具体应用。地震波在岩石中以球面波形式传播，当遇到波阻抗差异界面时，例如断层、岩体破碎带、岩性变化或岩溶发育带等，一部分地震信号反射回来，另一部分信号透射进入前方介质继续传播。反射的地震信号被高灵敏度的地震波三分量检波器接收，反射信号的传播时间与传播距离成正比，与传播速度成反比，因此可以根据检波器接收到的直达波速度、反射回波的时间、波形和强度等参数，根据数据处理结果对隧道掌子面前方地质条件进行预测。

对 TGP 探测成果应用中涉及的基本概念介绍如下：反射幅度比是反射回波幅度与前行波幅度之比，比值越大，表示回波反射越强，界面两侧的波阻抗差异越大，其中，正反射表明界面前方岩体相对于炮孔段向好，负反射表明界面前方岩体相对于炮孔段岩体向差。比速度曲线是由掌子面前方反射界面形成的反射同相轴的时间 - 距离关系，通过速度扫描得到的速度并非岩体的纵横波真速度。拟地震波曲线是表征地震波经过反射界面时的变化。低频和余震长表征传播介质破碎或软弱，且其宽度大；高频和余震短表征传播介质宽度小，介质较破碎。估算速度是掌子面前方岩体速度与已开挖炮孔段岩

体速度的对应比较。此速度的计算综合考虑纵横波比速度及反射幅度的变化，是一个综合成果，根据估算速度曲线可以推断预报段岩体速度与炮孔段岩体速度的相对比较关系。偏移归位图是表征隧道掌子面前方岩体中构造面的存在、规模及性质。可根据色谱的颜色及异常段的宽度及其他信息综合对异常进行定性的判断。波轴相似度是指实际的反射回波同相轴与理论的反射同相轴的相似比较，相似度越高，反应结果越可靠。

3.2.2 异常地质体的地震动态响应特征

如前述突涌事故孕险环境的分析中所指出，非可溶岩隧道的突涌事故一般发生在大的破碎带或隧道直接揭穿的松散堆积体中。TGP 作为有效的长距离探测手段，在综合超前地质预报体系中具有宏观预判和指导后续探测的重要作用。因此，研究非可溶岩中破碎带或软弱带等典型不良地质体对应于 TGP 探测成果的地震动态响应特征至关重要。

笔者通过对大量 TGP 探测成果与实际开挖揭示围岩的统计、比对、总结和分析，建立了非可溶岩中潜在的不良地质单元与 TGP 成果中的反射幅度比、波轴相似度等参数的对应关系。这里选取 15 次比较典型 TGP 探测成果中的 147 个纵波反射面，将其与实际开挖后揭示的地质条件对比，统计研究不同的动态响应特征所对应的实际异常地质体的规模和性质，具体如图 10, 11 所示。

从图 10 和 11 可看出，纵波的反射幅度比主要分布范围为 0.02~0.08，波轴相似度主要分布范围

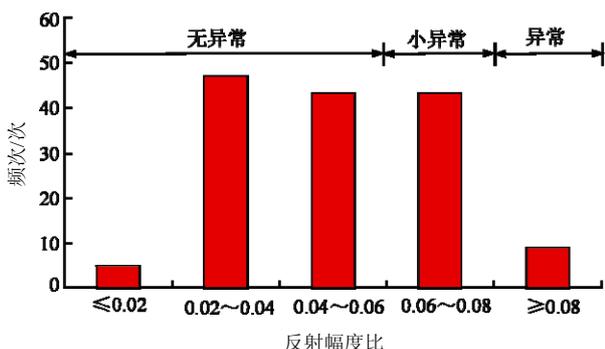


图 10 纵波的反射幅度比分布直方图

Fig.10 Histogram of reflection amplitude ratio for longitudinal wave

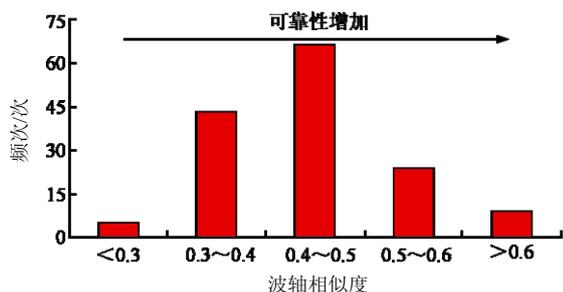


图 11 纵波的波轴相似度分布直方图

Fig.11 Histogram of wave shaft similarity for longitudinal wave

为 0.3~0.6, 而横波对应 2 个参数的基本规律与纵波的类似。当 TGP 探测成果的反射幅度比 < 0.06 且波轴相似度又较高时, 从探测及开挖结果的对比来看, 结构面主要是岩体中发育的张性节理和裂隙, 一般与隧道都呈大角度相交, 其规模和数量都比较少, 对隧道的开挖、安全及稳定性影响较小, 判定前方岩体基本无异常。当掌子面前方(有效探测距离内)存在影响隧道开挖、安全和稳定的破碎带、软弱带等大的不良地质单元时, TGP 成果的地震动态响应呈现如下特征:

(1) 当纵波估算速度相对已开挖段岩体速度稍有变小, 且纵横波的反射幅度比为 0.06~0.08, 但横波的反射幅度比比纵波的大时, 可能是富含地下水的节理裂隙密集带或带内岩体较完整的断层破碎带, 其宽度可以根据拟地震波曲线的余震长和偏移归位图的色谱确定。

(2) 当纵波估算速度相对已开挖段岩体速度不变或基本一致, 且横波的反射幅度比比纵波小, 其值一般都小于 0.08 时, 可能是不充水或者含水量较小的张性结构面或宽度较小的软弱带(岩脉和风化夹层等)。

(3) 当纵波估算速度相对已开挖段岩体速度显著变小, 且纵波的反射幅度比大于 0.08, 波轴相似

度也比较高时, 在非可溶岩中可能是断层破碎带或断层破碎带的影响带或地质条件骤变(由岩体进入全风化的残积土或软弱带)的情况, 需要引起注意。

以上动态响应的总结仅适用于不良地质单元与隧道呈大角度相交($> 30^\circ$)的情况, 角度较小时不适用于上述动态响应特征。

4 工程应用

4.1 工程及地质概况

岩前隧道属在建京台高速(南平段)A5 合同段, 位于建瓯市周元与迪口镇小凌坑村之间, 为左、右分离式隧道, 隧道长 6 795 m, 属特长隧道。岩前隧道位于闽北山区, 属低山丘陵地貌单元; 区内冲沟发育, 河谷呈“V”型或“U”型, 局部“U”型河谷, 两侧发育有 I, II 级阶地, 呈梯形阶梯状展布, 地势相对平坦, 多为农田或居民点。地形起伏较大, 隧址区高程为 344.8~822.6 m, 相对高差约 477.8 m, 隧道洞身段除进出口附近存在一定厚度的残坡积土及强风化岩石外, 隧洞全部为震旦系龙北溪组云母石英片岩, 新鲜岩石呈青灰色, 岩质坚硬, 岩芯呈柱状, 变晶结构, 片状构造, 主要矿物为石英、云母, 节理较发育, 单轴饱和抗压强度大于 60 MPa。隧址区域发育 6 条张扭性和张性断裂构造, 断裂带的宽度为 10~38 m, 带内岩体破碎、富含地下水。

4.2 综合超前地质预报

4.2.1 初步工程地质分析

本文以隧道开挖通过 F17 断层破碎带为例介绍突涌灾害预测方法的应用。已有的勘测设计资料介绍在里程 K35+100 处发育有 F17 断裂带, 断裂带长度大于 20 km, 宽度约 32 m, 为压扭性断裂构造, 带内岩体松散、破碎; 地下水丰富, 勘察时的地质钻孔曾发生反水现象; 此段隧道埋深近 52 m, 其中, 地表至 29 m 为残积土及第四纪松散堆积物, 呈散体状, 钻进容易, 取样困难; 29 m 以下至隧道洞顶为全、强风化的云母石英片岩, 受压性断裂构造的影响岩体破碎, 钻进困难, 无法取样。施工前的现场补充地质调查发现, F17 断层带出露在“U”型河谷的谷底, 两侧发育有 I, II 级阶地, 阶地上出露松散的第四纪堆积物, 呈梯形阶梯状展布, 地势相对平坦, 多为农田或居民点。隧道轴线以大角度穿过 F17 断层带, 靠近断层带有常年流水的小河流经。

综合以上信息分析、推断, 岩前隧道穿越 F17 断层具备发生突涌事故的水和松散碎屑物的物质条件, 同时具备存储空间的断层破碎带, 因此, 隧道

开挖过程中有发生突涌事故的可能性。但深部断层破碎带内岩体的性质、物质组成、破碎程度，碎屑物是否通过断层直接同待开挖的隧道连通等情况有待进一步确认。因此，施工过程中需对此断层影响范围、规模和物质组成进行系统探测、研究。

4.2.2 现场试验及物探测试

为了探测 F17 断层破碎带的位置和物质组成，在隧道里程 ZK35+243~165 段开展岩体强度、岩体波速、节理裂隙的统计和 TGP 探测工作，具体测点布置如图 12 所示。



图 12 测点布置示意图

Fig.12 Sketch of setout of measuring points

TGP 探测的测点由 26 个孔组成，其中，炮孔 24 个，沿隧道一侧洞壁布设，炮孔平行于隧道底面呈直线排列，孔距 2.0 m，孔深 2.0 m，炮孔高度 1.3 m，炮孔垂直于边墙向下倾斜 15°。2 个接收孔在离最后的炮孔 20 m 处的左右侧壁上，孔深 2.0 m，孔高同炮孔。岩体波速测试孔共用 TGP 探测的 3[#]、10[#]和 18[#]炮孔。岩体强度的取样点 3 个，取样位置如图 12 所示。

岩体波速测试采用单孔测试法，每 10 cm 采样一次，每孔测量 3 次，每次的测点位置严格对应，3 次的平均值做为岩体声波速度。3 个炮孔的不同深度处岩体声波波速监测结果如图 13 所示。

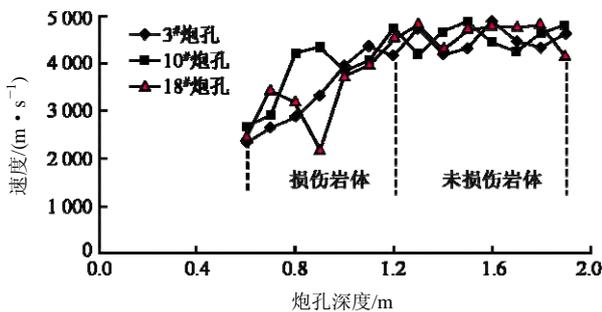


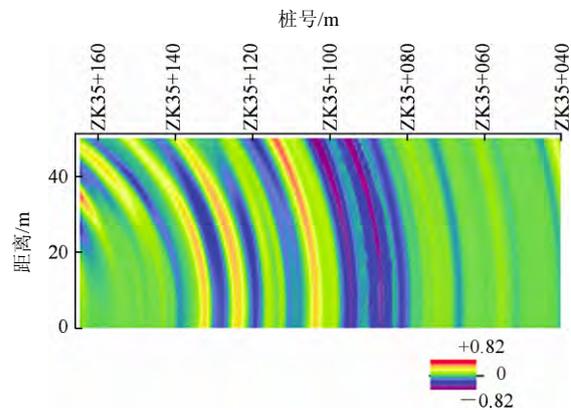
图 13 岩体声波波速监测结果

Fig.13 Monitoring results of acoustic wave velocity for rock mass

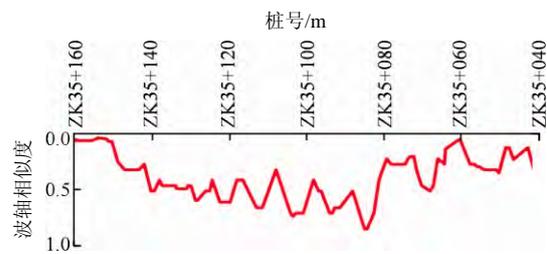
图 13 中以隧道的开挖轮廓线为基准零点，炮孔的孔底为 2 m。由图 13 可知，0.5~1.1 m 岩体的声波波速逐渐增大，表明此段围岩变得越来越好，究其原因可能是隧道爆破开挖时造成近区岩体的损伤、破坏的程度更大，距离爆源越远，损伤、破坏的程度

越轻。因此，此声波速度不是未扰动原岩的实际岩体速度。1.2~1.9 m 岩体的声波波速基本维持在一个较高值，并且变化趋于平稳，表明此段围岩基本不受隧道爆破开挖的振动影响，此段岩体的声波波速是未扰动原岩的真实速度，其值为 4 152~4 880 m/s。岩体单轴饱和抗压强度为 63.6~83.5 MPa。地质调查发现此段岩体中没有贯通性好、对围岩稳定性影响较大的裂隙或构造发育，岩体中仅零星发育随机节理。现场地质调查及试验结果表明，已开挖的炮孔段岩体强度较高、完整性较好，长距离的 TGP 测试在掌子面 ZK35+165 处开展，其结果如图 14 所示。

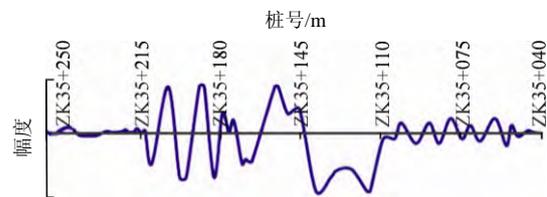
如图 14 所示，纵波偏移归位图的 ZK35+098~079 范围内有宽度大的负反射，与其对应的拟地震波曲线出现低频及余震长的特征，且主要反射面的



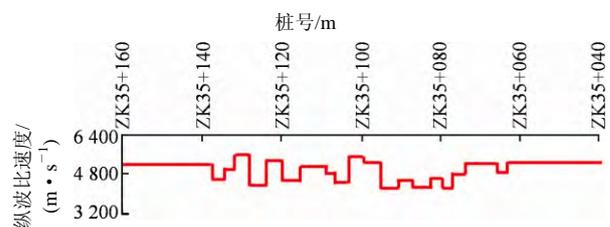
(a) 偏移归位图



(b) 波轴相似度



(c) 拟地震波曲线



(d) 纵波比速度

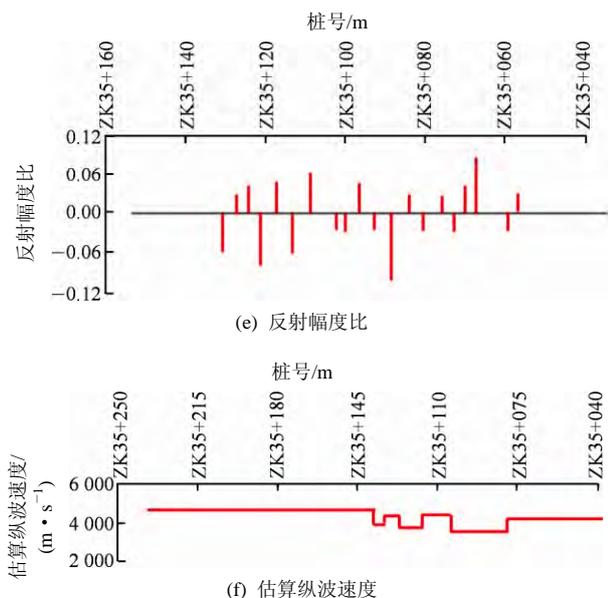


图 14 TGP 成果

Fig.14 Results of TGP

反射幅度比达到-0.098, 波轴相似度达到 0.81, 同时, 此段岩体的纵波估算速度仅为 3 800 m/s, 较已开挖段岩体实测速度显著要小, 结合初期的工程地质分析, 此段异常带很可能是 F17 断层破碎带。里程 ZK35+133~108 的纵波估算速度相对已开挖段岩体的速度显著下降, 且反射幅度比达到 0.088, 波轴相似度达到 0.06, 偏移归位图出现宽度较大的负反射, 结合前述分析, 此异常带可能是 F17 断层破碎带的影响带。但关于此异常带的具体规模、含水量和带内岩体的破碎程度等特征还需进一步通过地质雷达和钻探手段探测。

隧道向前掘进过程中, 节理裂隙逐渐增多, 开挖掌子面上偶尔可见牵引褶曲的出现, 同时岩体强度和完整性逐渐变差。典型掌子面照片如图 15 所示。



图 15 掌子面照片

Fig.15 Picture of tunnel face

地质雷达采用 GSSI 公司生产的 SIR20, 配属 100 MHz 的屏蔽天线, 探测时掌子面的里程桩号为 ZK35+142。其探测结果如图 16 所示。

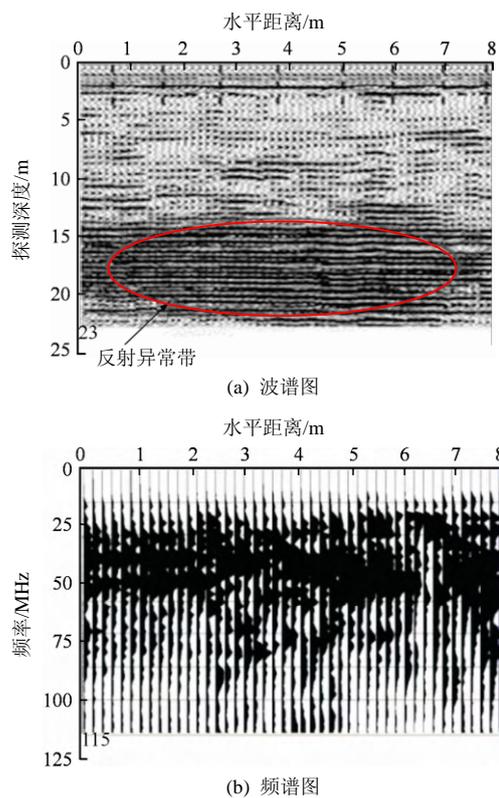


图 16 地质雷达探测成果

Fig.16 Exploring results of ground penetration radar

图 16 显示: 本次预报里程为 ZK35+142~119, 预报距离仅为 23 m。掌子面前方 8~15 m 范围内地震波谱的同相轴振幅较大, 同相轴连续性较差, 波幅也较大, 波形错段、分叉等现象较严重, 推测该段岩体完整性较差, 局部变得松散、破碎。15~23 m 范围内地震波谱的反射波振幅、波幅更大, 同相轴连续性好, 据此推断掌子面前方 15 m 处岩体发生突变、岩体明显变得更差。地震频谱的频率区间为 30~110 MHz, 比 100 MHz 天线的正常频带区间要宽, 但高频成分衰减强烈, 主频降低到 60 MHz 左右, 同样较正常主频要低, 推断前方岩体的强度和完整性将大幅降低。综合前述的工程地质分析和 TGP 探测结果, 推测断面 ZK35+134 处隧道已经接近 F17 断层破碎带的影响范围。

超前水平钻探采用回转取芯钻进行, 同样在桩号 ZK35+142 的掌子面上进行, 累计钻进约 15 m。从桩号 ZK35+135.4 开始岩体的钻进速度明显加快, 冲洗液中的岩石碎屑成分越来越少, 泥砂成分越来越多, 取样困难, 岩芯采样率低, 仅能取出少量的碎石和砂。从桩号 ZK35+128.6 开始钻孔中的回水水压、水量骤然增大, 水体浑浊、泥砂含量高, 钻孔被迫停止。超前水平钻探工作基本验证物探成果, 从桩号 ZK35+135.4 开始进入 F17 断层破碎带, 带

内岩体强度、完整性明显变差，含水量明显增大，带内岩体松散、破碎、泥砂含量高。超前水平钻孔施工照片如图 17 所示。



(a) (b)

图 17 超前水平钻孔照片

Fig.17 Pictures of advanced horizontal drilling

综合物探和钻探成果，发现前方隧道具备突涌事故发生的物质条件、存储及运移的空间条件，发生突涌事故的可能性非常高。因此，需及时发出隧道突涌灾害预警，并采取超前加固和支护措施避免事故的发生。

5 结 论

实践表明，非可溶岩隧道的突涌灾害主要发生在构造破碎带、风化深槽和不同岩性接触带上，其独特的孕险环境为灾害预测提供可能。通过本文研究工作，得到如下结论：

(1) 非可溶岩隧道突涌的本质是开挖或爆破扰动触发赋存在破碎带或软弱带中的水和碎屑物在自身压力作用下涌入隧道，发生突涌事故，其孕险环境必须同时具备物质条件、空间条件和触发条件，三者缺一不可。

(2) 非可溶岩隧道突涌灾害的孕险环境中的物质条件是充足的水和砾石、砂、泥等原地性或外源性的碎屑物；空间条件是突涌物的存储和运移的破碎带或软弱带等；触发条件是岩体的开挖扰动和爆破扰动。

(3) 基于地质、物探和钻探相结合的综合超前预报体系，可以有效辨识非可溶岩隧道掌子面前方能够赋存潜在突涌物的破碎带或软弱带及其带内物质组成、固结程度。

(4) 非可溶岩隧道中可以通过 TGP 探测成果的反射幅度比、波轴相似度等参数的地震动态响应特征来综合辨识异常地质体的大概位置、规模。其地震响应特征经验的总结在非可溶岩隧道中具有一定的推广应用价值。

(5) 对于非可溶岩隧道，技术上能够准确预报潜在的不良地质单元，但是参建单位需要对预报结

论给予足够重视，制定并实施切实可行的应对措施，才能真正避免突涌灾害事故的发生。否则，照样发生各类灾害事件。

参考文献(References) :

- [1] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004, 30(1): 7 - 9.(WANG Mengshu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railway Investigation and Surveying, 2004, 30(1): 7 - 9.(in Chinese))
- [2] 石少帅, 李术才, 李利平, 等. 岩溶区隧道暗河的综合预报及治理方案研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 227 - 233.(SHI Shaoshuai, LI Shucai, LI Liping, et al. Comprehensive geological prediction and management of underground river in karst areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 227 - 233.(in Chinese))
- [3] 李利平, 李术才, 陈 军, 等. 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): 1 345 - 1 356.(LI Liping, LI Shucai, CHEN Jun, et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1 345 - 1 356.(in Chinese))
- [4] 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): 1 297 - 1 307.(LI Shucai, XUE Yiguo, ZHANG Qingsong, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 297 - 1 307.(in Chinese))
- [5] SONG K, CHO G C, CHANG S B. Identification, remediation, and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea[J]. Engineering Geology, 2012, 135/136: 92 - 105.
- [6] TSENG D J, TSAI B R, CHANG L C. A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 175 - 183.
- [7] ZHANG G H, SONG L, et al. A case study on treatment measures for a rock tunnel-final[J]. Disaster Advance, 2012, 5(4): 1 451 - 1 457.
- [8] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52(6): 139 - 162.
- [9] HOEK E. Big tunnel in bad rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(9): 726 - 740.
- [10] LIN H I, LEE C H. An approach to assessing the hydraulic conductivity disturbance in fractured rocks around the Syueshan tunnel, Taiwan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 222 - 230.
- [11] 赵永贵, 刘 浩, 孙 宇, 等. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 460 - 464.(ZHAO Yonggui, LIU Hao SUN Yu, et al. Research progress in tunnel geological prediction[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 460 - 464.(in Chinese))
- [12] 刘志刚, 刘秀峰. 断层参数预测法预报隧道断层[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1 547 - 1 550.(LIU Zhigang, LIU Xiufeng. Determination of tunnel fault by the method of fault parameter forecast[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1 547 - 1 550.(in Chinese))
- [13] CREMER F, JONG de W, SCHUTTE K. Fusion of polarimetric infrared features and GPR features for landmine detection[C]// Proceeding of the 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar(IWAGPR). Delft, Netherlands: [s. n.], 2003: 1 - 6.
- [14] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 89 - 91.(LI Daxin. Ground penetrating radar method and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 89 - 91.(in Chinese))