

# 全强风化花岗岩隧道突水灾害机制与协同治理技术研究

袁敬强<sup>1</sup>, 陈卫忠<sup>1,2</sup>, 黄世武<sup>3</sup>, 周小生<sup>3</sup>, 周曾辉<sup>1</sup>, 刘金泉<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. 广西信达高速公路有限公司, 广西 南宁 530021)

**摘要:** 针对广西山心隧道屡次发生的突水灾害, 采用现场勘探、室内试验与理论分析方法, 对全强风化花岗岩隧道突水灾害机制、灾变特征与防治对策进行了深入研究。结果表明: 山心隧道突水灾害具有突发性强、灾变演化速度快、次生灾害严重及影响范围大的特点, 突水灾害发生的孕险环境因素为地层水稳定性差、导水通道发育、地下水与地表水丰富、带状谷地汇水负地形, 而注浆实施不到位、防突岩土体留设厚度不足及施工扰动是隧道突水灾害主要致灾因子, 在施工扰动与地下水压力共同作用下, 掌子面渗透失稳形成突水通道并迅速演化扩展, 继而引起地表塌陷、井塘干涸等次生灾害。综合考虑隧道施工与地表生态环境安全, 制定了“以堵为主、排堵结合、分段治理、动态施工”的总体治理原则, 优化确定复合帷幕注浆、全断面帷幕注浆及动态施工的协同治理技术体系, 应用于山心隧道全强风化花岗岩段突水灾害的防治实践。

**关键词:** 隧道工程; 全强风化花岗岩; 突水机制; 孕险环境因素; 致灾因子; 协同治理

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)增 2-4164-08

## Mechanism and synergetic treatment technology of water inrush disaster in completely and strongly weathered granite tunnels

YUAN Jingqiang<sup>1</sup>, CHEN Weizhong<sup>1,2</sup>, HUANG Shiwu<sup>3</sup>, ZHOU Xiaosheng<sup>3</sup>, ZHOU Zenghui<sup>1</sup>, LIU Jinquan<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*; 3. *Guangxi Xinda Highway Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530021, China*)

**Abstract:** Water inrush disaster in weathered granite regions with abundant water does tremendous harm to the construction of tunnels and surrounding environment. Combining with the treatment practice of water inrush disaster of Shanxin tunnel in Guangxi Zhuang Autonomous Region, the water inrush mechanism, character of disaster and countermeasures were studied by conducting geophysical and drilling exploration at field, laboratory experiments and theoretical analysis. It shows that the water inrush disaster happens suddenly and has strongly destructive influence with high evolution speed. The risk environment factor of water inrush disaster in weathered granite regions are disintegration of surrounding soil, interconnected channels of groundwater, abundant

**收稿日期:** 2015-08-25; **修回日期:** 2015-11-09

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036006); 国家自然科学基金资助项目(51225902, 51509246)

Supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(Grant No. 2013CB036006) and National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51225902 and 51509246)

**作者简介:** 袁敬强(1985-), 男, 博士, 2009年毕业于中国矿业大学地质工程专业, 现任助理研究员, 主要从事隧道突水灾害机制与防治方面的研究工作。E-mail: jqyuan@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1167

groundwater recharge, and banded valley topography. Meanwhile, unsatisfactory of grouting implementation, insufficient of outburst prevention thickness and disturbance of excavation is the dominant inducing factor to cause water inrush disaster. Under the influence of excavation disturbance and groundwater pressure, the advancing face loses stability because of seepage failure and evolves rapidly to form water inrush disaster, even inducing ground collapse and severe water losses, etc. Considering the safety of tunneling construction and ecological environment, general treatment principle of water inrush disaster is proposed, which emphasizes on giving priority to seal water by grouting combining with the drainage work. Further on, according to the different geological conditions caused by water inrush disaster, corresponding treatment scheme should be adopted with dynamic construction principle. In order to seal water and reinforce the completely weathered granite, the synergetic treatment technology is optimised, with composite curtain grouting and full-face curtain grouting. And the proposed synergetic treatment technology is adopted in the design of treatment of water inrush disaster and applied into practice.

**Key words:** tunneling engineering; completely and strongly weathered granite; water inrush mechanism; risk environment factor; inducing factor; synergetic treatment technology

## 1 引言

我国华南地区花岗岩分布广泛,特别是在福建、广东、桂东南与湘南、赣南一带最为集中<sup>[1]</sup>,这些地区气候炎热、降雨丰富,岩体风化作用强烈。同时,由于花岗岩节理裂隙发育,风化作用可以沿着节理面向岩体内部深入,使得花岗岩的结构、构造及整体性遭到破坏,其强度与稳定性大为降低。天然状态的风化花岗岩通常具有较高的强度与较低的压缩性,但在浸水后其强度明显降低,在全强风化花岗岩地区隧道建设过程中,极易因开挖扰动与卸荷损伤而软化崩解,甚至产生流动坍塌,导致突水突泥灾害,甚至引发地表塌陷、房屋开裂及水源枯竭等次生灾害,造成重大经济财产损失与人员伤亡事故。

目前,在风化花岗岩的结构组成、力学特性等方面开展了较多工作,尚彦军等<sup>[2]</sup>通过开展压汞测试、颗粒分析及 X 射线衍射等微观结构分析试验,对全风化花岗岩孔径分布、颗粒组成、矿物成分变化特征及指标相关性进行了研究,并进一步对花岗岩风化带划分进行探讨<sup>[3]</sup>;马海毅等<sup>[4]</sup>通过开展原位及室内试验,系统分析了广东阳江和台山核电站风化花岗岩物理力学特性,认为水对风化花岗岩强度参数,特别是黏聚力的弱化作用明显;陈卫忠等<sup>[5]</sup>根据风化花岗岩应力-渗流耦合试验成果,建立了强风化花岗岩的应变硬化的弹塑性模型和黏聚力演化方程;吴能森<sup>[6-7]</sup>对花岗岩残积土的分类及崩解特性进行了研究,从结构性角度分析了花岗岩残积土的崩解机制;颜波等<sup>[8]</sup>分析了花岗岩风化土“崩岗”

破坏机制,认为土体结构性、粒间吸力特性决定了其遇水软化和崩解的性质。

由于全风化花岗岩具有遇水软化、崩解失稳的特点,在隧道建设过程中多采用注浆技术对地层进行预加固处理。张顶立等<sup>[9-10]</sup>提出海底隧道的复合注浆技术,通过注浆方式与注浆材料的复合分步改善工程载荷作用的边界条件,解决围岩的渗透、强度及稳定性问题;李治国等<sup>[11]</sup>结合厦门翔安海底隧道帷幕注浆实践,对全风化花岗岩注浆堵水加固机制进行了探讨,并通过现场开挖证明了注浆法的有效性;孙锋<sup>[12]</sup>结合翔安海底隧道注浆试验,提出全风化花岗岩地层中浆液扩散方式主要以挤密-劈裂为主。

现阶段对于全强风化花岗岩隧道突水灾害机制的研究较少,鉴于全强风化花岗岩隧道突水灾害的复杂性,本文结合广西山心隧道全强风化花岗岩地段突水灾害处治实践,通过开展系统的现场勘探、室内试验与理论分析,对突水灾害孕险环境因素与关键致灾因子进行探讨分析,揭示富水风化花岗岩隧道突水机制,进而在综合考虑隧道施工与地表生态环境安全的基础上,提出“以堵为主、排堵结合、分区治理、动态施工”的总体治理原则,并优化确定复合帷幕注浆、全断面帷幕注浆与动态施工的协同治理技术体系。

## 2 工程与突水灾害概况

### 2.1 工程概况

在建的山心隧道位于广西岑溪市境内,是包茂高速(G65)岑溪至水文段的关键控制工程,也是目前

广西地区最长的高速公路隧道，隧道全长 4 288 m (右洞 CK6+477 ~ CK10+765、左洞 DK6+460 ~ DK10+725)，呈 NNW 走向，最大埋深 450 m，设计型式为小净距分离式双向四车道隧道，为穿越高水压富水区域的深埋长大隧道。

隧道位于广西东南部的构造侵蚀型中低山地貌区，云开大山北麓东段，地形起伏较大，“V”型沟谷发育。根据施工详勘及补充勘察资料，隧道洞身穿越地层主要为全风化~微风化混合花岗岩，其中 V 级围岩段长约 280 m，隧道在 K7+780 ~ K8+020 区间穿越山心村富水全强风化花岗岩段，局部地形为中间低、四周高的带状谷地，该段隧道底板高程平均为 312 m，埋深约 100 m，隧道轴线布置与未开挖段地质纵剖面分别如图 1，2 所示。

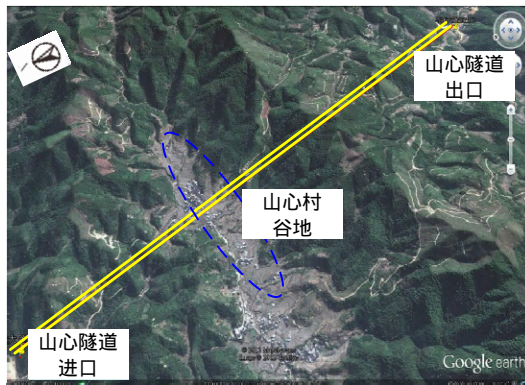


图 1 隧道轴线布置图

Fig.1 Axial layout of tunnel

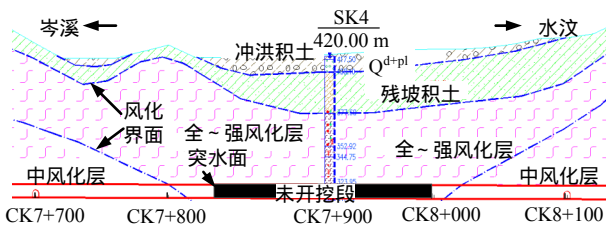


图 2 未开挖段隧道地质纵剖面图

Fig.2 Geological profile of no excavation section of tunnel

隧道穿越地层主要由区域变质作用所形成的混合岩组成，岩性接近花岗岩，局部存在石英岩脉，表层易风化及风化厚度极不均匀，据勘察资料，按风化程度将其划分为全风化、强风化、中风化及微风化 4 个风化层。

隧址区地下水主要为冲洪积层、残坡积层中的潜水，以及风化混合花岗岩中基岩裂隙水，其中，强~中风化层及侵入岩脉接触带的富水、导水性好，而全风化层的富水性较差，根据现场钻孔压水试验结果，全风化花岗岩平均渗透系数为  $9.3 \times 10^{-6}$  m/s，而强风化花岗岩渗透系数为  $5.8 \times 10^{-5} \sim 7.0 \times 10^{-4}$  m/s。稳定地下水位距地表约 2.5 m，地下水与地表水联系密切，由于地表溪流网密度大，含水层发育，对隧道施工影响很大，施工过程中多次出现突水、突泥等灾害，造成极大的施工困难，隧道施工过程中的主要灾害如表 1 所示。

## 2.2 突水灾害概况

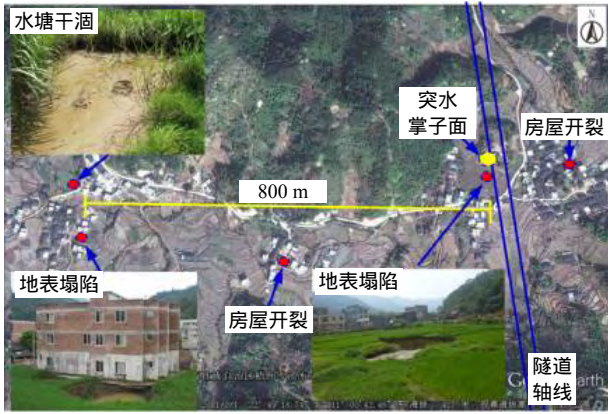
### (1) 9.11 突水灾害

2013 年 9 月 11 日早晨 6 30 左右，正在开挖施工的隧道右洞 CK7+838 上台阶掌子面出现股状涌水，水柱直径开始约为 4 cm，随后突水口逐渐增大至 80 cm，最大突水量达 1 280 m<sup>3</sup>/h，9 月 13 日后，涌水量略有降低并保持在 700 m<sup>3</sup>/h，至 9 月 21 日晚，隧道突水掌子面上方地表塌陷，坍塌体堵塞充填使地下水径流通道发生变化，洞内涌水量锐减至 45 m<sup>3</sup>/h 左右。隧道突水 1 d 后，距离隧道掌子面西侧 800 m 外的山心村村委附近地表塌陷、井塘干涸，突水 10 d 后，隧道上方地表也出现塌坑(见图 3)，导致洞内局部坍塌、初支变形侵限，左洞初支也出现明显的变形，期间累计突水量达  $25 \times 10^4$  m<sup>3</sup>，淤积泥砂约 2 500 m<sup>3</sup>，造成巨大的经济财产损失与不良社会影响。

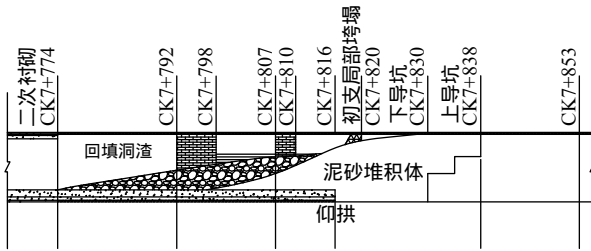
表 1 山心隧道施工灾害统计

Table 1 Disaster statistics of construction in Shanxin tunnel

里程	发生日期	灾害类型	洞内灾害描述	地表灾害描述
DK7+520	2012/05/12	掌子面涌水	左洞中台阶开挖后，拱顶最大沉降速度达 20 cm/h，累计沉降量达 40 cm，裂缝宽度达到 25 cm 左右	地表一处荒芜水田积水流失，周边土体干缩裂缝，裂缝最大宽度约 3 cm
DK7+800	2013/08/12	初支垮塌、洞内塌方	左洞拱顶至左拱腰出现塌方，将 5 根初支从拱顶压垮，塌方体体积约 100 m <sup>3</sup>	地表无明显变化
CK7+838	2013/09/11	特大突涌水、地表塌陷	右洞上台阶掌子面开挖后突涌水，最大涌水量 1 280 m <sup>3</sup> /h，洞内被淹、局部塌方与初支垮塌	地面多处塌陷、部分井塘干涸、房屋开裂、路面开裂等
DK7+963	2014/09/19	涌水突泥、地表坍塌	左洞掌子面拱顶右侧由股状涌水演化为突泥灾害，瞬间突泥量达 300 m <sup>3</sup> /min，洞内淤积突泥体 2 800 m <sup>3</sup>	掌子面上方农田塌陷，塌坑直径约 25 m、体积约 1 600 m <sup>3</sup>
CK7+835	2015/05/01	特大突涌水、地表塌陷	右洞上台阶掌子面开挖后突涌水，最大涌水量 600 m <sup>3</sup> /h，洞内被淹、局部塌方	地面多处塌陷、部分井塘干涸，塌坑体积约 500 m <sup>3</sup>



(a) 地表次生灾害



(b) 洞内灾害示意图

图 3 “9·11 突水”灾害后地表与洞内情况

Fig.3 Water inrush disaster of Shanxin tunnel on the 11th September, 2013

### (2) 5.1 突水灾害

恢复施工的隧道右洞进口端掌子面，采用径向注浆换拱方案逐步通过原 9·11 突水所造成的泥砂堆积段落，2015 年 5 月 1 日 14 00 左右，上台阶掌子面推进至 CK7+835 里程，在施工初期支护时，上台阶右侧拱脚位置处出现直径约 15 cm 的股状水，涌水量约 40 m<sup>3</sup>/h，现场堆积沙袋并采用喷射混凝土封闭涌水口，涌水暂时止住。16 00 左右涌水量增大，并突破封闭沙袋及掌子面，涌水量增加至 600 m<sup>3</sup>/h，洞内涌水情况如图 4 所示。突水 1 d 后，山心村村委附近地表河流多处塌陷断流，突水 3 d 后，



图 4 “5.1 突水”掌子面突水情况

Fig.4 Water inrush disaster of Shanxin tunnel on the 1st May

原 9·11 突水灾害造成的地表塌陷处再次出现塌坑。至 5 月 9 日，隧道掌子面才得以有效封闭，期间累计涌水量达 10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>，淤积泥砂约 1 000 m<sup>3</sup>。

## 3 突水灾害机制分析

### 3.1 孕险环境因素分析

山心隧道突水灾害发生与演化过程表明，富水全强风化花岗岩隧道突水灾害具有突发性强、灾变演化速度快、次生灾害严重及影响范围大的特点。而通过系统开展现场补充钻探与物探、室内物理力学试验及理论分析工作，确定山心隧道全强风化花岗岩不良地质段发生突水灾害的孕险环境因素。

#### (1) 导水通道发育

施工勘察及突水灾害发生之后的补充钻探、高密度电法勘探工作表明，山心村段区域地质构造为近 EW 向富水风化深槽，如图 5 所示。由于存在多期次的岩浆侵入与区域变质作用，在侵入岩接触带、不同风化程度地层接触界面经常发育较为畅通的渗流通道，具有较为显著的导水与蓄水功能，同时，

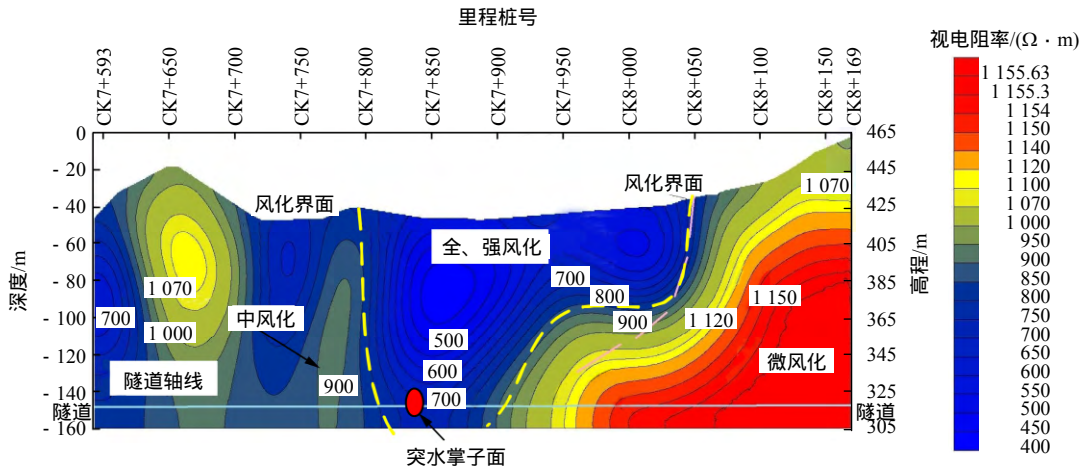


图 5 高密度电法勘探地层剖面

Fig.5 Exploration results of high density resistivity method



强~中风化花岗岩与风化石英岩脉同样具备良好的导水性，与风化界面导水通道共同构成突水通道。

(2) 地层水稳定性差

突水之前掌子面开挖揭露主要为全风化混合花岗岩，室内 X 射线衍射分析表明其主要矿物成分为石英、高岭石、伊利石等，天然状态的风化花岗岩通常具有较高的强度与较低的压缩性，然而由于矿物亲水性弱、表面能较小<sup>[8]</sup>，在浸水后其强度明显降低，水稳定性较差，特别是在开挖卸荷条件下，极易因扰动与卸荷损伤而软化崩解，甚至产生流动、坍塌。采用规程<sup>[13]</sup>中土体湿化试验方法，对全风化花岗岩土样的水稳定性进行试验，全风化花岗岩土样浸水 30 min 内崩解率即达到 95%以上，如图 6 所示。

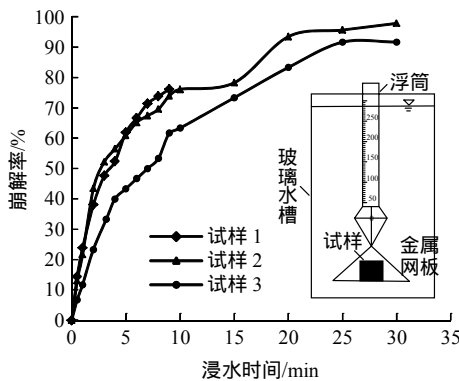


图 6 全风化花岗岩试样崩解试验曲线

Fig.6 Disintegration curves of completely weathered granite samples

(3) 地下水与地表水丰富

地下水与地表水是隧道发生突水灾害的物质基础，隧址区降雨丰富，年均降雨量约 1 500 mm，根据水文地质勘探成果，隧址区地下水的常年平均补给量约为  $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，排泄量约为  $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (平水期)和  $0.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (丰水期)，而隧道开挖后对地下水的疏干量可达  $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。9 月 11 日上午 11 时(突水发生 4 h 后)，即开始利用隧道突水掌子面上方地表原有的地下水监测孔位开展持续测量，监测结果如图 7 所示，随着突水的发展，地下水位持续下降，至 9 月 21 日晚地表塌陷、洞内水量显著减小之后，地下水位开始迅速回升，表明地表水与地下水联系密切，动态补给作用强烈。

突涌水发生后，现场开展了大范围的水文地质勘探工作，勘探表明高程 330~340 m 范围内为明显的富水区域，富水区域在隧道顶板高程附近，地下水流向为自西向东，隧道突水掌子面与地表汇水区

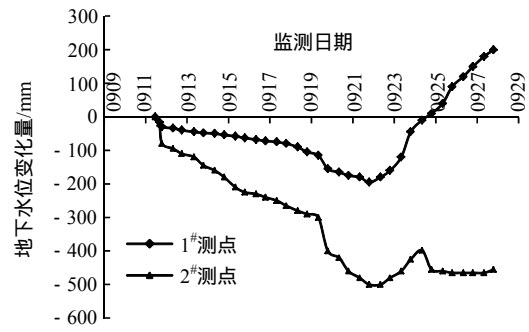


图 7 地下水位监测变化曲线

Fig.7 Monitoring curves of ground water level

存在高达 80 m 的水头差，而地下水位与隧道底板之间的水头差超过 60 m 时具有强致灾性<sup>[14-15]</sup>，直接揭露时瞬时涌水量大且速度快，常造成突水灾害。隧道突水封堵后，在掌子面施工的超前钻孔单孔涌水量达  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ ，水压力达 0.75 MPa。

(4) 带状谷地汇水负地形

地形地貌是地质构造作用的重要反映，根据汇水能力可以划分为不同水平的负地形<sup>[13]</sup>。沟谷、盆地、洼地等负地形都是较为发育的汇水地貌，相应的汇水面积越大，地表水补给地下水的强度越大。

山心隧道突水段地表为一相对封闭的带状谷地，其长轴方向与隧道轴线基本垂直，谷地 EW 向长约 2 900 m，SN 向最宽处约 400 m，呈现大型负地形特征，为较大的汇水盆地，水源补给面积大，汇水能力强，为地下水提供了源源不断的补给。

3.2 致灾因子分析

在隧道施工阶段发生突水灾害的致灾因子主要为工程因素，包括注浆加固效果不理想、开挖支护措施不当、超前预报未能有效判识风险源及监控量测不到位等。

在 9.11 突水灾害发生前，现场根据富水风化花岗岩深槽段掌子面渗涌水量较大的情况，采用了溶液型化学注浆堵水加固方案，但仅对隧道起拱线以上掌子面轮廓线外 2.5 m 范围内的土体进行了化学注浆，加固范围小，且未能形成完整的堵水加固圈，在施工扰动后注浆薄弱处容易形成涌水通道。而在 5.1 突水灾害发生前，通过径向注浆换拱方案逐步处理隧道内淤积的泥砂，并在拱顶 120°范围内进行大管棚超前注浆支护，但掌子面前方仍未能形成完整的堵水加固圈。

此外，隧道施工采用三台阶预留核心土开挖工法，由于掌子面为自稳能力差的全风化花岗岩，在开挖扰动与地下水作用下产生软化崩解，由于缺少系统的超前探水数据，防突岩土体厚度留设不足，

使得在开挖扰动与地下水共同作用下，掌子面发生局部渗透失稳并迅速演化发展为突水灾害。

### 3.3 突水灾害机制分析

从地下水动态平衡的角度分析，突水灾害的发生是由于施工活动打破地下水补给、径流及排泄过程的均衡状态，产生集中迅速的人工排泄通道，并改变地下水的径流特征，从而引发突水灾害。

如图 8 所示，由于山心隧道所穿越的全风化花岗岩地层水稳定性差、导水通道发育、地下水与地表水丰富且具备带状谷地汇水负地形，为突水灾害的发生提供了物质与能量基础，而在注浆实施不到位时就进行开挖施工，掌子面防突岩土体厚度由于缺乏系统的超前探查数据而留设不足，在施工扰动与地下水压力共同作用下掌子面局部首先出现渗透失稳，所形成地下水排泄通道与原径流通道相连接，在静水压力与动水冲蚀共同作用下突水通道迅速扩展演化，最终导致突水灾害的发生，并引发地表塌陷、井塘干涸等次生灾害。

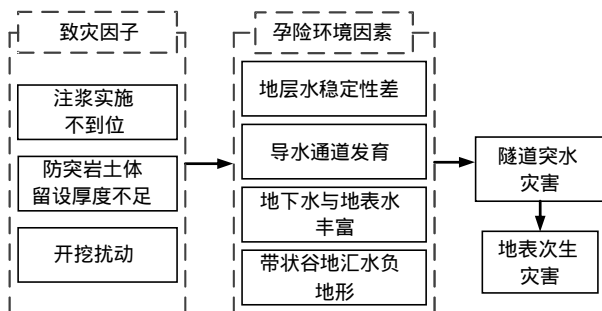


图 8 山心隧道突水灾害形成机制

Fig.8 Mechanism of water inrush disaster of Shanxin tunnel

## 4 突水灾害协同治理技术

### 4.1 协同治理技术体系建立

针对山心隧道全风化花岗岩水稳定性差、隧址区地下水补给充沛、水压高且径流量大的不良地质条件，并考虑突水灾害对围岩结构及地表环境的扰动破坏，突水灾害处治需要综合考虑隧道施工与地表生态环境安全，因此提出“以堵为主、排堵结合、分区治理、动态施工”的总体治理原则，优化确定复合帷幕注浆、全断面帷幕注浆与动态施工的协同治理技术体系。

#### (1) 以堵为主

山心村不良地质段主要为全风化混合花岗岩，围岩稳定性较差，遇水易崩解软化甚至泥化，地下水丰富且补给迅速，水量大且水压力较高，以排为主的处治方案难以保证施工安全。因此，需要

通过全断面帷幕注浆进行堵水加固，一方面用来降低地层的渗透性，封堵地下水向隧道开挖面流动，另一方面是利用注浆层的强度来提高围岩承载力<sup>[16]</sup>，并改善全风化花岗岩的水稳定性。

#### (2) 排堵结合

山心隧道全风化花岗岩段突水灾害机制分析表明，突水水源来自地表汇水、松散层潜水与地下水径流补给，由于汇水面积大且地表为带状谷地负地形，隧道承受的水压力达 0.7 MPa 以上，因此，在掌子面实施全断面帷幕注浆堵水加固后，还应在已开挖支护段落设置环向排水管，将初衬渗漏水及超前泄水孔流水集中引排，降低作用于衬砌结构上的外水压力，也为掌子面堵水加固提供一定的地下水排泄通道。

#### (3) 分区治理

山心隧道屡次发生的突水灾害对于围岩结构造成不同程度的扰动，因此，将未贯通段围岩沿隧道轴线方向划定为严重扰动段与轻微扰动段。

在严重扰动段落，由于突水冲刷潜蚀，细颗粒流失量大，结构松散，地下水径流通道发育且流速较大，若单独采用水泥类浆液，其扩散范围与注浆效果受地下水流动冲刷影响较大，因此需要采用复合帷幕注浆方案，如图 9 所示，即首先在隧道开挖轮廓线外使用抗分散性能优良的聚氨酯类化学浆液形成桶形止水圈<sup>[17]</sup>，从而直接减少地下水向隧道内的渗流量，为开挖轮廓线内注浆创造近似于静水的地下水环境条件，然后使用水泥类浆液加固地层。

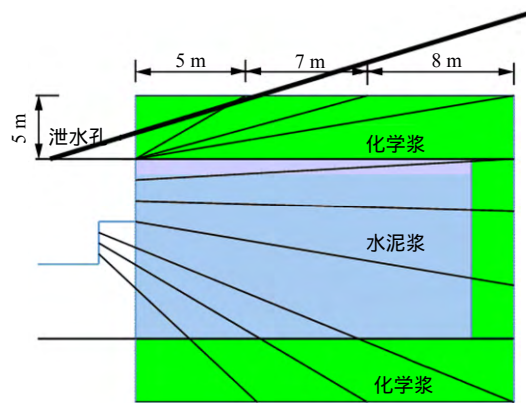


图 9 复合帷幕注浆方案示意图

Fig.9 Sketch of composite curtain grouting scheme

对于轻微扰动段落，室内试验与类似工程实践均表明浆液扩散以劈裂为主<sup>[18-19]</sup>，地下水渗流速度较为缓慢，综合考虑技术经济指标，确定采用传统全断面帷幕注浆方案，根据成孔情况选用前进式分段注浆或钻杆后退式分段注浆，浆液以水泥水玻璃

双液浆与快硬硫铝酸盐水泥单液浆为主。

(4) 动态施工

采用钻探与物探相结合的方案，开展全面的超前探查工作，确定掌子面前方岩土体结构特性、地下水压力与流量特征，并建立帷幕注浆钻孔与注浆记录数据库，根据堵水加固实施效果对帷幕注浆材料、工艺及压力流量等参数进行动态优化，实现注浆过程的信息化。同时，为全面掌握隧道施工过程中结构受力变形特征、地表沉降与水位变化，需开展系统的监控量测工作，并及时分析处理，保证隧道施工与地表生态环境安全。

4.2 应用实施与效果评价

采用三维有限元方法对未注浆方案，3，5 及 8 m 厚帷幕注浆圈方案进行对比分析，隧道涌水量、支护结构变形及地表沉降计算结果如表 2 所示。

表 2 不同帷幕注浆圈计算结果

Table 2 Calculation results of water inflow and deformation with different thicknesses of curtain grouting

计算方案	掌子面涌水量/ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	拱顶沉降/ mm	拱底隆起/ mm	水平收敛/ mm	地表沉降/ mm
未注浆	49.5	68.1	78.2	40.5	14.8
3 m 注浆圈	5.5	29.4	31.2	25.2	4.5
5 m 注浆圈	4.4	23.4	25.6	22.1	3.6
8 m 注浆圈	4.0	17.7	18.3	20.5	3.1

可以看出，采用帷幕注浆厚度达到 3 m 厚即可显著降低隧道渗涌水量、减小结构变形与地表沉降，但在全风化花岗岩地层中注浆时，由于浆液以劈裂、挤密形式为主，较难达到均匀渗透扩散的效果，实际帷幕注浆厚度选取应考虑一定的安全系数，综合确定山心隧道全断面超前注浆帷幕圈厚度为 5 m。

山心隧道右洞回填反压后涌水量为  $45 m^3/h$ ，根据地下水动力学计算分析可知地下水流速非常小，考虑为静水条件下的注浆工况。掌子面全风化花岗岩土体有效粒径  $d_{10}$  仅为  $3 \mu m$  左右，与超细水泥平均粒径相当，可注性分析表明浆液将主要以劈裂、挤密形式扩散，因此在全风化花岗岩地层中进行注浆时，并不需要过分强调浆液颗粒的粒径，采用水泥基浆液就能够满足要求，水灰比  $W/C$  为  $0.8 \sim 1.2$ 。同时，为了应对注浆过程中出现的渗涌水量大的情况，需要配合使用抗分散性能好的聚氨酯浆液、水泥水玻璃浆液或快硬硫铝酸盐水泥浆液。

考虑富水全风化花岗岩地层成孔条件差、浆液扩散不均匀，帷幕注浆循环长度不宜过长，取为 20 m。注浆工艺以分段前进式注浆为主，在钻孔涌水量大、

塌孔严重段落配合使用钻杆后退式注浆。同时，注浆压力控制标准也与注浆分段相适应，即：浅部  $0 \sim 6 m$  段落，终孔注浆压力为  $1.7 \sim 2.6 MPa$ ，深部  $10 \sim 20 m$  段落，终孔注浆压力为  $4 \sim 5 MPa$ 。

研究确定的突水灾害协同治理技术体系已在现场试验段中应用实施，开挖揭露表明：掌子面树根状浆脉密集分布，渗水量显著减小，堵水率达 90% 以上，整体稳定性显著增加，如图 10 所示。



图 10 突水灾害治理后开挖掌子面情况

Fig. 10 Photo of advancing face after water intrush disaster countermeasures finishing

5 结 论

结合广西山心隧道突水灾害处治实践，通过开展现场勘探、室内试验与理论分析，对全强风化花岗岩隧道突水灾害机制、灾变特征及协同治理技术进行了深入探讨，主要结论如下：

(1) 全强风化隧道突水灾害具有突发性强、灾变演化速度快、次生灾害严重及影响范围大的特点。

(2) 山心隧道突水灾害发生的孕险环境因素为地层水稳定性差、导水通道畅通、地下水与地表水丰富及带状谷地汇水负地形，致灾因子包括注浆实施不到位、防突岩土体留设厚度不足及开挖扰动。

(3) 隧道所处区域水源充足、补给迅速、径流通道畅通，水压力大且地层水稳定性差，为突水灾害的发生提供了物质与能量基础。而超前勘探工作不充分、堵水加固效果不理想时就进行开挖施工，在施工扰动与水压力共同作用下，掌子面渗透失稳形成突水通道并迅速演化发展，最终导致突水灾害的发生，并引发地表塌陷、井塘干涸等次生灾害。

(4) 综合考虑隧道施工与地表生态环境安全，提出了“以堵为主、排堵结合、分区治理、动态施工”的总体治理原则，优化确定复合帷幕注浆、全断面帷幕注浆与动态施工的协同治理技术体系。

## 参考文献(References)：

- [1] 李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 中国地貌区划新论[J]. 地理学报, 2013, 68(3): 291–306.(LI Bingyuan, PAN Baotian, CHENG Weiming, et al. Research on geomorphological regionalization of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(3): 291–306.(in Chinese))
- [2] 尚彦军, 王思敬, 岳中琦, 等. 全风化花岗岩孔径分布-颗粒组成-矿物成分变化特征及指标相关性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 545–1 550.(SHANG Yanjun, WANG Sijing, YUE Zhongqi, et al. Variation features of pore radius and particle diameter distributions and mineral content of completely decomposed granite and correlation of parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1 545–1 550.(in Chinese))
- [3] 尚彦军, 史永跃, 金维俊, 等. 花岗岩风化壳分带与岩体基本质量分级关系探讨[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 858–1 864.(SHANG Yanjun, SHI Yongyue, JIN Weijun, et al. Discussion on relationship between weathering crust zonation and basic quality classification of rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 858–1 864.(in Chinese))
- [4] 马海毅, 鲁祖德. 粤西滨海核电站址强风化花岗岩物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 361–366.(MA Haiyi, LU Zude. Investigation of physico-mechanical properties for highly weathered granite of nuclear power station in coastal site of western Guangdong province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 361–366.(in Chinese))
- [5] 陈卫忠, 曹俊杰, 于洪丹, 等. 强风化花岗岩弹塑性本构模型研究(I): 理论模型及参数反演[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3 207–3 211.(CHEN Weizhong, CAO Junjie, YU Hongdan, et al. Study of elastoplastic constitutive model of strongly weathered granite Part I: Theoretical model and parameter inversion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3 207–3 211.(in Chinese))
- [6] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2 299–2 304.(WU Nengsen. Study on classification of granite residual soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2 299–2 304.(in Chinese))
- [7] 吴能森. 花岗岩残积土的崩解性及软化损伤参数研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(3): 58–62.(WU Nengsen. A study on calving property and softening damage parameter of GRS[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2006, 23(3): 58–62.(in Chinese))
- [8] 颜波, 汤连生, 胡辉, 等. 花岗岩风化土崩岗破坏机制分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, (6): 68–71.(YAN Bo, TANG Liansheng, HU Hui, et al. The mechanism of disintegration damage of granite weathered soil[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, (6): 68–71.(in Chinese))
- [9] 张顶立, 孙锋, 李鹏飞. 海底隧道复合注浆机制研究及工程应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 32(3): 445–452.(ZHANG Dingli, SUN Feng, LI Pengfei. Mechanism of composite grouting in subsea tunnel and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 32(3): 445–452.(in Chinese))
- [10] ZHANG D L, FANG Q, LOU H C. Grouting techniques for the unfavorable geological conditions of Xiang'an subsea tunnel in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(5): 438–446.
- [11] 李治国, 孙振川, 王小军, 等. 厦门翔安海底服务隧道 F1 风化槽注浆堵水技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 3 841–3 848.(LI Zhiguo, SUN Zhenchuan, WANG Xiaojun, et al. Grouting technology for water blockage of weathered slot F1 in Xiamen Xiang'an subsea service tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 22(Supp.2): 3 841–3 848.(in Chinese))
- [12] 孙锋. 海底隧道风化槽复合注浆堵水关键技术研究[博士学位论文][D]. 北京交通大学, 2010.(SUN Feng. Study on the key technique of composite grouting for water blockage in weathered slot of subsea tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.(in Chinese))
- [14] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 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): 1 757–1 766.(XU Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, et al. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1 757–1 766.(in Chinese))
- [15] LI S C, ZHOU Z Q, LI L P, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38(9): 50–58.
- [16] 吉小明, 谭文. 饱和含水砂层地下水渗流对隧道围岩加固效果的影响研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2010, 29(增 2): 3 655–3 662.(JI Xiaoming, TAN Wen. Study of influence of groundwater seepage on reinforcement effect of tunnel surrounding rock in saturated water-bearing sand layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.2): 3 655–3 662.(in Chinese))
- [17] 袁敬强, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 速凝浆液抗分散性质与凝胶性能试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2015, 34(5): 960–967.(YUAN Jingqiang, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, et al. Experimental study of anti-washout property and gelling performance of fast-gelling grout[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 960–967.(in Chinese))
- [18] 袁敬强. 富水风化花岗岩隧道注浆机制与突水治理技术研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.(YUAN Jingqiang. Mechanism of grouting and treatment technology of water inrush disaster in water-rich weathered granite tunnels[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.(in Chinese))
- [19] 李蓉, 李治国. 海底隧道全强风化花岗岩地层注浆技术研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(1): 21–29.(LI Rong, LI Zhiguo. Study on the grouting technology adopted in strong-weathered granite for an under-sea tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(1): 21–29.(in Chinese))