

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.02.13

隧道典型致灾构造及突水模式分析

贺振宇,郭佳奇,陈帆,檀俊坤

(河南理工大学土木工程学院,河南焦作 454000)

摘要: 隧道工程的建设广泛面临着突水灾害的威胁,突水灾害常给工程造成重大的经济损失和人员伤亡。根据致灾构造的成因将隧道典型致灾构造分为断裂带、岩溶含水体、向背斜和单斜含水层、人工富水空间和地下不良地质体五大类;根据隧道围岩条件及破坏特征,归纳出六类防突层类型,相应的提出六种突水破坏模式:整体压裂破坏、剪切破坏、劈裂破坏、关键块失稳破坏、渗透破坏和整体滑移破坏;最后分析了三个典型的工程案例,对提高施工人员对潜在致灾构造的识别、指导隧道施工具有重要意义。

关键词: 隧道突水;典型致灾构造;防突层结构;突水模式

中图分类号: P642.12

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)02-0097-11

Analysis of typical disaster-causing structure and water inrush model of tunnel

HE Zhenyu, GUO Jiaqi, CHEN Fan, TAN Junkun

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: The construction of tunnel engineering is faced with the threat of water inrush, and the water inrush often causes great economic losses and casualties. According to the causes of disaster-causing structure, the typical disaster-causing structures can be divided into five categories: fracture zones, karst bodies, aquifer of syncline, anticline and monoclinic, artificial water-rich spaces and underwater bad geological body. According to the surrounding rock conditions and the failure characteristics of the tunnel, six types of outburst prevention layers are summarized, and six failure patterns of water inrush are proposed: the whole fracturing failure, shear failure, splitting failure, destabilization failure of key blocks, seepage failure and integral slide failure. Finally, three typical water inrush cases are analyzed. It is of great significance to improve the identification of potential disaster structures and guide the construction of tunnels.

Keywords: tunnel water inrush; typical disaster-causing structure; outburst prevention layer; water inrush mode

0 引言

目前,我国在隧道建设方面,无论是隧道总长度还是总数量都是世界之最,然而随着西部大开发

战略的快速推进,以及跨江越海隧道的兴建,越来越多的深长隧道不得不穿越各种复杂的地质环境,使得隧道工程的建设广泛面临突水灾害的威胁^[1-3]。例如,2002年,渝怀线圆梁山隧道先后发

收稿日期: 2017-01-11; 修订日期: 2017-02-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036003);河南理工大学博士基金资助项目(B2012-016);国家自然科学基金项目(51474097)

第一作者: 贺振宇(1989-),男,硕士研究生,研究方向为隧道与地下工程。E-mail:438074792@qq.com

通讯作者: 郭佳奇(1981-),男,副教授,博士,主要从事隧道与地下工程方面的教学和研究工作。E-mail:gjq519@163.com

生大规模突水突泥 71 次,造成 9 人死亡,最高水压 4.6 MPa,最大涌水量达 $7.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[4];宜万线马鹿箐隧道先后发生特大突水突泥灾害 19 次,2006 年 1 月 21 日与 2008 年 4 月 11 日的两次特大突水突泥灾害共导致 15 人死亡,工期延误超过两年^[5];齐岳山隧道在建过程中共遭遇 187 处大型岩溶管道、溶洞,高压富水断层带、可溶岩与非可溶岩界面等不良地质,发生 18 次突水灾害,累计抽水量达 $6.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[6-7];京广铁路大瑶山隧道穿越 9 号断层时涌水量达到 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其竖井也被淹没,造成严重损失;麻武高速公路大别山隧道 YK19 + 670 ~ YK19 + 703 和 YK20 + 000 ~ YK20 + 030 段,裂隙带与夹层处发生涌水,涌水量达到 $1.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$,导致现场施工中断^[8];青函隧道穿越岩体破碎软弱区时发生的突水事故,瞬时出水量达 $85 \text{ m}^3/\text{min}$,造成隧道工期延长^[9];挪威奥斯陆海湾的海底公路隧道施工过程中遭遇 15 m 宽的松散冰碛沉积带,预测到涌水而被迫停工^[10]。由以上案例可知,导致突水突泥灾害的不良地质构造不尽相同,不同的致灾构造所引发的突水规模也不相同,因此,总结归纳隧道致突水灾构造类型及其突水模式,对提高施工人员防灾意识,及时采取合理的工程措施,避免或减小突水灾害造成的经济损失,保障施工人员人身安全有重要意义。

目前,大量学者和工程技术人员对隧道致灾构造及突水模式的进行了有益研究。其中 Lu, Yaoru 等^[11]提出了深部封闭岩溶、富水岩溶管道、位于隧道顶部的地下暗河以及断层带四种岩溶隧道致灾构造;Li, Xiaozhao 等^[12]对由断裂、风化、岩溶和顶部渗透作用形成的位于地表附近的富水裂隙网络(EFKZ),提出了用于评估隧道对 EFKZ 地下水和生态条件潜在影响的 TEIF 参数方法;Zhao, Yong 等^[13]把隧道突水类型简要归纳为断层型、裂隙型、岩溶管道型和风化洞穴型,隧道突泥类型简要归纳为断裂型、岩溶洞穴、岩溶通道和风化洞穴型;蒙彦等^[14]、王建秀等^[15]将可能引发隧道突水的构造分为向斜盆地储水构造、断层破碎带、不整合面和侵入岩接触面、岩溶管道和地下暗河、其他含水构造和含水水体;Song, Ki-Il 等^[16],依托南韩岩溶发育地区 Sol-an 隧道工程建设项目,采用区域侦察和地质线性研究方法、地球物理调查技术、地面钻孔的基于钻孔的调法以及水平探针钻孔,重点分析了岩溶陷落柱发生坍塌

导致地表沉陷的原因;邬立等^[17]对野三关隧道“8·5”突水事故分析,将该地区的岩溶构造分为强岩溶含水层和溶蚀裂隙两大类;周毅^[18]通过灾害源的形态特征、补给特征、富水特征及充填特征对灾害源进行了简要划分;石少帅^[19]通过隧道工程突水案例统计分析,把突水致灾构造概括为裂隙型、断层型、溶洞溶腔型、管道及地下河型;罗雄文等^[20]对深长隧道的水害进行了分析并提出了五种致灾构造和突水模型;李新宇等^[21]主要针对越江跨海隧道施工过程中不良地质体的突水模式进行了研究,并归纳了四种突水模式。

从上述分析可见,目前的研究成果主要源于对具体工程或者单一不良地质体的研究,并且多数集中在对岩溶隧道灾害的研究,而对隧道突水致灾构造及突水模式系统全面的研究成果较少。本文通过对国内外隧道突水灾害的统计分析,按隧道致灾构造的地质成因将典型致灾构造进行系统分类,归纳隧道防灾层结构,分析其对应的突水模式,并分析了三个典型的隧道工程突水实例,期望对隧道超前地质预报有指导意义,提高隧道施工人员对潜在致灾构造的识别。

1 隧道建设环境特点及突水灾害统计

随着我国经济的快速发展,我国交通、水利等基础设施也在加快建设,特长和长大隧道以及大规模隧道群不断涌现,隧道的建设难度越来越大,尤其是在山岭地区,复杂的地质条件和水文条件给隧道工程的建设带来了极大的困难,特别是特殊、复杂的岩溶地质环境、强烈发育的破碎带、裂隙带等地质构造,常常引发隧道突水灾害^[22]。另外,近几年我国开始不断兴建水下隧道以减轻区域交通压力,与山岭隧道相比,水下岩体软化,有效应力降低,隧道围岩稳定性易恶化,高渗透性围岩极易发生突水,并多数与上部水体(江河湖海等)有紧密的水力联系,给跨江越海隧道的施工带来极大的安全风险^[23]。

本文对国内外典型隧道突水突泥灾害进行了统计^[21,24-27],并从隧道突水灾害特点、规模以及致灾构造进行总结(表 1),经分析发现,隧道突水致灾构造具有多样性,并且隧道突水突泥灾害的特点及规模与致灾构造类型紧密相关,必须对隧道突水致灾构造有充分的认识,才能对隧道突水进行有效防治。

表 1 隧道突水灾害的统计

Table 1 Statistics of water inrush hazards in tunnels

序号	工程名称	致灾构造	灾害特点	灾害规模
1	圆梁山隧道 DK354 + 879	充水溶洞	突水	突水峰值涌水量 3 000 m ³ /h
2	圆梁山隧道 DK361 + 764	岩溶管道、顺层裂隙发育	持续涌水	最大涌水量 216 m ³ /min
3	云雾山隧道 DK244 + 907	含水充填岩溶管道	突水突泥	突水量 150 ~ 420 m ³ /h
4	钟家山隧道 YK91 + 383	断层破碎带	突泥突水	累计突泥 22 500 m ³ 、泥水 1 400 m ³
5	马路箐隧道 PKD255 + 978	充填型溶腔	突水	突水峰值涌水量 30 × 10 ⁴ m ³ /h
6	齐岳山隧道 PDK365 + 313	可溶岩与非可溶岩接触带压性断层带	突水	瞬间峰值突水量 5 × 10 ⁴ m ³ /h
7	野三关隧道 DK124 + 602	断层破碎带	突水	突水最初 30 min 涌水量 15 100 m ³
8	鸡公岭隧道 ZK19 + 512 ~ + 515	层间裂隙	喷涌	总突水量 35 ~ 45 L/s
9	峡口隧道斜井 XJK0 + 093	充填溶腔	突泥	突泥总量 76 700 m ³
10	紫金山隧道 ZK221 + 960	溶洞与地下暗河连通	突水	突水量 5 000 m/h
11	别岩槽隧道 DK406 + 422	可溶岩与非可溶岩接触带	突水	初期水压 p > 10 MPa
12	别岩槽隧道 DK406 + 680 ~ + 710	断层带、暗河	持续涌水	峰值涌水量达 2 100 m ³ /h
13	大别山隧道 ZK19 + 990	裂隙带	持续涌水	持续涌水
14	歌乐山隧道 DK2 + 620	层间滑动破碎带	涌水	水量 80 m ³ /h
15	赛里木湖隧道	与坡面导水层相交	持续涌水	峰值涌水量 12 000 m ³ /d
16	鹰嘴岩隧道 ZK39 + 822 ~ + 845	充填型岩溶竖井	持续涌水	峰值涌水量 3 000 m ³ /h
17	通渝隧道 K21 + 780	裂隙发育强烈、充填型溶洞	突水突泥	塌方量 5 000 m ³ 以上
18	大相岭隧道 YK61 + 773	泥质充填小断层	持续涌水	涌水量 17 000 m ³ /d
19	五指山隧道 K29 + 543	断层破碎带	突水	峰值突水量 16 000 m ³ /d
20	八卦岭隧道 DK132 + 340	大型溶洞	突水突泥	涌水量 15 000 m ³ /h
21	砭霜坳隧道 RK63 + 094 ~ + 102	岩溶非常发育	喷涌	喷涌
22	飞水岩隧道 DK6 + 045 ~ + 047	裂隙发育强烈	持续渗水	持续涌水
23	华蓥山隧道 YK34 + 518	裂隙带	持续涌水	持续涌水
24	回弄山隧道 ZK3 + 970	断层带	持续涌水、间隔突泥	涌水量 1 676 m ³ /h
25	寒岭界隧道 K88 + 597	断层破碎带	突水	突水量达 43 200 m ³ /h
26	大支坪隧道 PDK132 + 960	岩溶洞穴	突水	突水量达到 1 500 m ³ /h
27	石板岭隧道 K31 + 667	断层破碎带	持续涌水	涌水量 3 500 m ³ /d
28	上皮林隧道 YK45 + 110	充填型溶洞	突水涌泥	突水涌泥
29	厦门海底隧道 NK12 + 088	全一强风化围岩岩脉	持续渗水	持续渗水
30	青函隧道(海底隧道) K31 + 667	断层破碎带	持续涌水	峰值涌水 5 100 m ³ /h
31	旧丹那隧道	断层	突水	最大突水量 28.8 × 10 ⁴ m ³ /d
32	新永成隧道 N8 + 058	断层带	突泥突水	总突泥水量 15 000 m ³
33	厄尔布尔士辅助隧道 TM 4524	断层带	突水涌泥	最大突水量约 2 900 m ³ /h
34	大清水隧道	膨胀性蛇纹岩和 8 处断层	突水	最大突水量 3 600 m ³ /h
35	北穆隧道	岩溶侵蚀带	突泥	最大突泥量 2.5 × 10 ⁴ m ³ /h

2 隧道突水涌泥致灾构造及概化模型

隧道突水突泥致灾构造主要是指极有可能在隧道开挖过程中诱发突水突泥灾害的不良地质构造。本文综合以上统计分析,将隧道突水致灾构造总结归纳为五大类型:断裂作用形成的断裂带、溶蚀作用形成的岩溶含水体、向背斜和单斜含水层、人工富水空间和(江河湖海)水下不良地质体;然后根据各类致灾构造的不同表现形式,进一步提出了致灾构造的 13 个子类型。

2.1 断裂带

在构造运动过程中,大型断裂构造发育时,其周

围常伴随小型断裂构造的发育且多呈带状分布,形成断裂带。断裂带附近区域,岩性破碎、岩层裂隙发育,是地下水良好的贮存和导水构造,同时也是岩溶构造发育的良好空间。当隧道开挖不断接近富水夹泥断裂带时,由于围岩破碎且强度较低,在高压水作用下极易发生突水突泥灾害。本文按断裂带的表现形式将断裂致灾构造分为 3 个子类型:断层型、层间断裂型、裂隙/溶隙型,并提出了各子类型的概化模型。

(1)断层型致灾构造的概化模型见图 1。

(2)层间断裂型致灾构造的概化模型见图 2。

(3)裂隙/溶隙型致灾构造的概化模型见图 3。

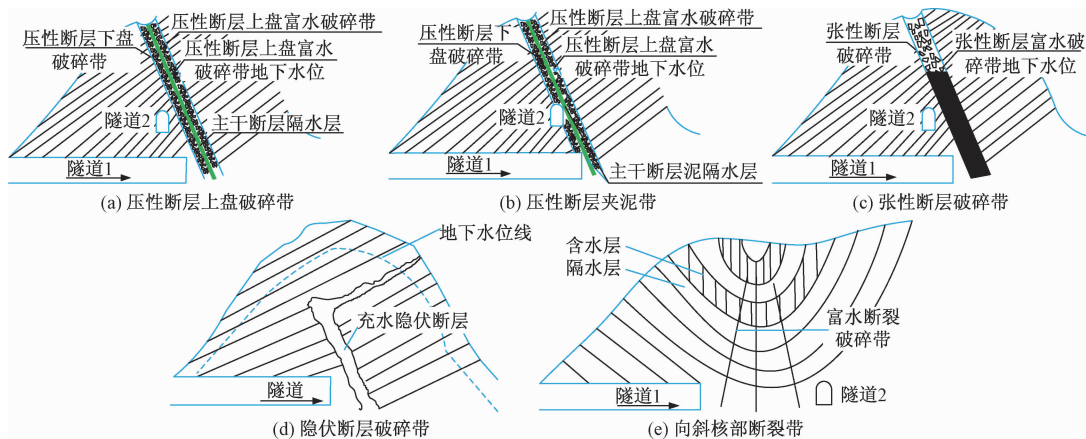


图1 断层型致灾构造的概化模型

Fig.1 Generalized models of fault type disaster-causing structure

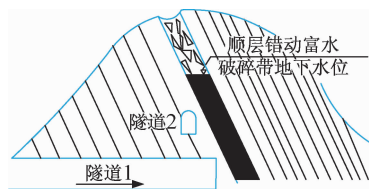


图2 层间断裂型致灾构造概化模型

Fig.2 Generalized models of layer-fractured type disaster-causing structure

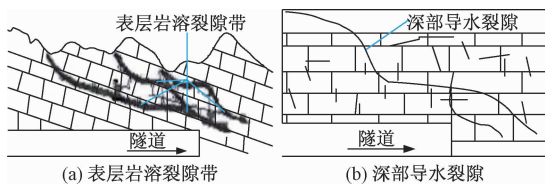


图3 裂隙/溶隙型致灾构造概化模型

Fig.3 Generalized models of the fissure / solution fissure type disaster-causing structure

2.2 岩溶含水体

岩溶是水对可溶性岩石的溶蚀作用所形成的地表及地下各种景观。岩溶的发育开始于水流对可溶性岩石原有狭小裂隙的溶蚀扩展,裂隙岩体在水流长期的潜蚀、冲蚀、侵蚀作用下发生崩塌、塌陷与滑动,形成大规模的充水岩溶体,同时在化学、物理的风化、搬运、堆积与沉积作用下,岩溶体底部常被沉积物充填^[28]。岩溶发育地区严重威胁隧道工程的建设,在隧道施工过程中常常造成塌方、落石、突水突泥、瓦斯突出等灾害,其中突水突泥灾害最为严重。本文根据岩溶的发育形态和规模把充水充泥岩溶含水体分为3个子类型:溶腔(溶洞)型、地下暗河型、岩溶管道型,并提出了各子类型的概化模型。

(1)溶腔(溶洞)型致灾构造的概化模型见图4。

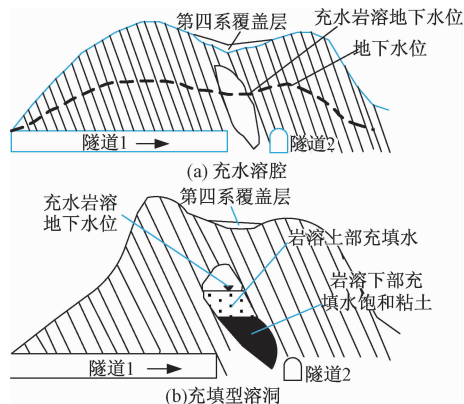


图4 溶腔(溶洞)型致灾构造概化模型

Fig.4 Generalized models of karst cave type disaster-causing structure

(2)地下暗河型致灾构造的概化模型见图5。

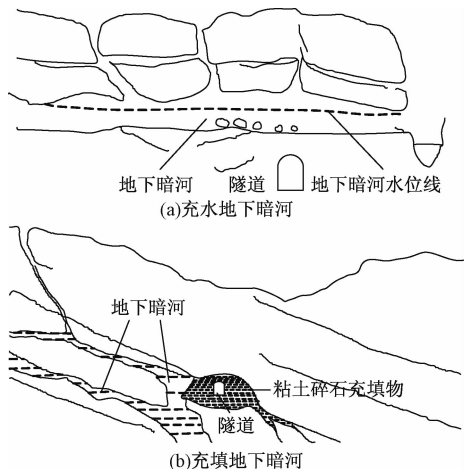


图5 地下暗河型致灾构造概化模型

Fig.5 Generalized models of the underground river type disaster-causing structure

(3) 岩溶管道型致灾构造的概化模型见图 6。

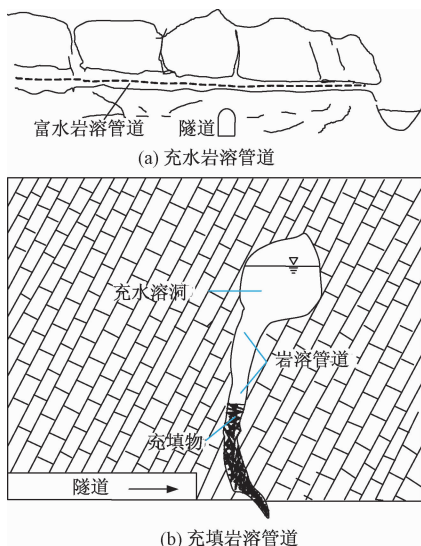


图 6 管道型致灾构造概化模型

Fig. 6 Generalized models of pipeline type disaster-causing structure

2.3 向背斜和单斜含水层

地下褶曲和单斜构造若存在相对隔水层和相对含水层,则能形成地下水的富集空间。相对隔水层的岩体相对致密、渗透率低;相对含水层的岩体相对破碎、孔隙率高、渗透率高,成为地下水的富集地层。当隧道穿越该类构造时,极有可能发生较大的突水突泥灾害。本文根据褶曲和单斜致灾构造岩层形态的差异将其具体分为向斜构造含水层、背斜构造含水层和单斜构造含水层 3 个子类,并提出了各子类的概化模型。

(1) 向斜构造含水层致灾构造的概化模型见图 7。

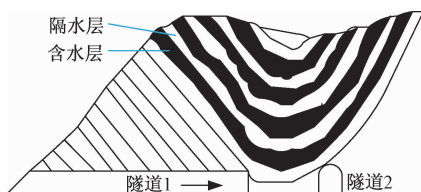


图 7 向斜构造含水层致灾构造概化模型

Fig. 7 Generalized models of aquifer disaster-causing structure of the syncline

(2) 背斜构造含水层致灾构造的概化模型见图 8。

(3) 单斜构造含水层致灾构造的概化模型见图 9。

2.4 人工富水空间

随着国家矿业布局的逐渐优化,一些规模小、技术落后、安全隐患大的矿场逐渐退出历史舞台,其遗留下来的人工采挖空间——废弃矿巷,在地应力、构造应力

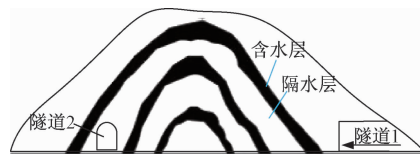


图 8 背斜构造含水层致灾构造概化模型

Fig. 8 Generalized models of aquifer disaster-causing structure of the anticline

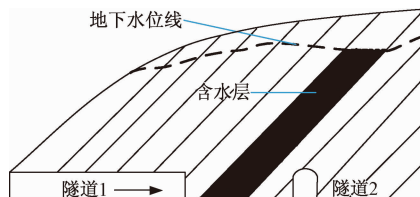


图 9 单斜构造含水层致灾构造

Fig. 9 Generalized models of aquifer disaster-causing structure of the monoclinic

和地下水的长期作用下,废弃矿巷的支护结构逐渐破坏,形成良好的集水廊道,成为充水废弃矿巷。然而,随着我国隧道工程建设大规模的开展,越来越多的隧道需穿越山岭地区废弃的矿厂,一旦遭遇大量充水的废弃矿巷,极有可能导致隧道发生突水突泥灾害。由于充水废弃矿巷的形成过程与以上各类均不同,故将其概化模型单独列出(图 10)^[29]。

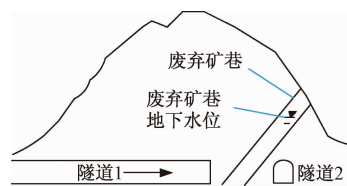


图 10 充水废弃矿巷概化模型

Fig. 10 Generalized models of abandoned mine roadway disaster-causing structure

2.5 水下不良地质体

随着我国经济和社会的高速发展,现代城市交通运输能力愈显不足,为节省土地资源、保护环境、缓解区域交通压力,水下交通隧道的建设显得越来越重要。由于水下隧道多为浅埋,在施工过程中极易遇到水下不良地质体,发生渗漏及突水的风险很大,并且发生突水灾害时其最大的特点是水源无限补给,给工程造成灾难性的破坏。本文将水下隧道可能遇到的主要不良地质构造分为风化槽、含水砂层、侵入岩岩脉 3 个子类型,并提出了各子类型的概化模型^[30]。

(1) 风化深槽致灾构造的概化模型见图 11。

(2) 含水砂层致灾构造的概化模型见图 12。

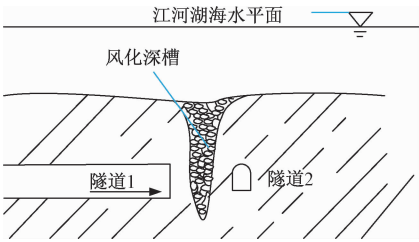


图 11 深风化槽致灾构造概化模型

Fig. 11 Generalized models of disaster-causing structure of weathered deep trough

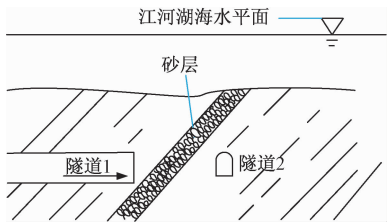


图 12 含水砂层致灾构造概化模型

Fig. 12 Generalized models of disaster-causing structure of water-sandy layer

(3)侵入岩岩脉致灾构造的概化模型见图 13。

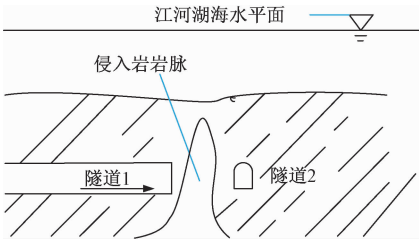


图 13 侵入岩岩脉致灾构造概化模型

Fig. 13 Generalized models of disaster-causing structure of intrusive rock veins

3 防突层结构及其突水模式

防突层是指存在于隧道开挖临空面与致灾构造之间且起到隔水阻泥作用的岩土体结构,是灾害源突入隧道的最后一道屏障。防突层结构形式多样,可分布在隧道洞体的任何方位,隧道施工过程中突水灾害的发生与否取决于防突层结构的最小安全厚度。

本文根据隧道致灾构造与隧道临空面之间的围岩结构类型,总结归纳了六类防突层结构:完整岩体结构、层状碎裂岩体结构、断续岩体结构、块状破碎岩体结构、土石间架结构和致密散体结构。由于不同的防突层的结构特征有很大差异,在相同的致灾构造条件下,其突水模式也不相同(表 2)。

3.1 完整岩体防突结构整体压裂分析

一般情况下,由地下岩溶水溶蚀和冲刷作用形成的溶腔、管道,其边界岩壁具有较高的完整性,为探究完整岩体防突结构发生突水突泥的突水模式,采用如图 14 所示的概化模型对其突水模式进行分析。

由图 14 可知,对于完整岩体防突结构,由于结构内节理裂隙基本不发育,只要保证足够的厚度,则能形成良好的阻泥隔水屏障,但当隧道逐渐靠近高压富水溶腔或岩溶管道时,完整型岩体防突结构的厚度逐渐被削弱,同时防突层在开挖扰动与渗流损伤的共同作用下,抵抗高压岩溶水的能力不断降低,最终达到强度破坏的临界状态,在微小的扰动下便会导致完整岩体防突结构的整体压裂破断,导致突水突泥灾害的发生。

表 2 防突层结构及其突水模式

Table 2 The structure of outburst prevention layer and its water intrush mode

防突层结构	结构特征	突水模式
完整岩体结构	结构完整,结构内不存在或存在微小结构面	高压水整体压裂破坏
层状碎裂岩体结构	结构被某些贯通结构面切割	沿优势结构面的剪切破坏
断续岩体结构	结构比较完整,结构内存在断续结构面,但无贯通结构面	高压水劈裂破坏
块状破碎岩体结构	结构比较破碎,结构面错综复杂	关键块失稳破坏
土石间架结构	土-石界面和石-石界面存在空隙	渗透破坏
致密散体结构	结构致密,透水性弱,与岩壁的接触带为薄弱部位	整体滑移(剪切)破坏

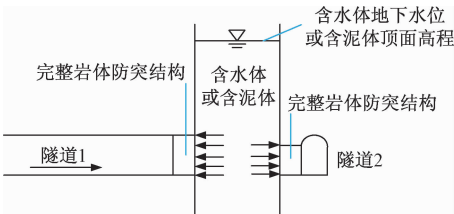


图 14 完整岩体防突结构模型

Fig. 14 The structure model of intact rock mass

3.2 层状碎裂岩体防突结构剪切破坏分析

层状碎裂岩体结构往往发育贯通致灾构造与隧道的节理、裂隙,贯通的节理、裂隙构成防突结构的薄弱结构面,是防突结构破坏时的优势破坏面,采用如图 15 所示的概化模型对其突水模式进行分析。

由图 15 可知,对于层状破碎岩体防突结构,由于结构内节理裂隙发育,防突结构的抗剪强度较低,多个

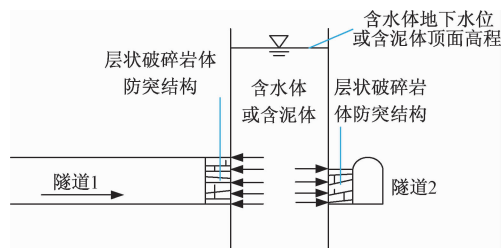


图15 层状破碎岩体防突结构模型

Fig. 15 The structure model of layered fractured rock mass

结构面切穿防突结构,为地下水 and 泥的突出提供了有利条件。当隧道开挖接近但未揭穿致灾构造时,由于临空面的形成改变了原地下水的自然平衡条件,加速了地下水在节理裂隙内的径流循环,对裂隙内的胶结介质不断地冲刷和溶蚀,并且在高压地下水的作下,节理裂隙的张开度增大,极大的降低了防突结构的抗剪强度,最终在大体量地下水或水泥混合体的自重作用下,由贯通结构面切割而成的优势滑移块体发生剪切破坏。

3.3 断续岩体防突结构劈裂破坏分析

断续岩体防突结构中存在着岩桥和未贯通的节理、裂隙,几乎不存在贯通裂隙,其破坏机制既不同于完整岩体防突结构,也不同于层状碎裂岩体结构,也是在工程实践中经常出现并引发突水突泥灾害的一种岩体结构,采用如图16所示的概化模型对其突水模式进行分析。

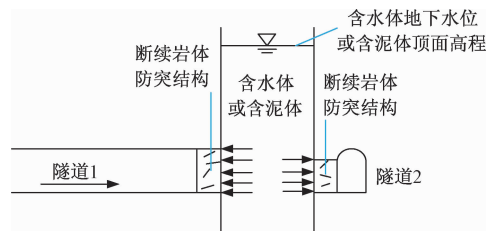


图16 断续岩体防突结构模型

Fig. 16 The structure model of discontinuous rock mass

由图16可知,对于断续岩体防突结构,虽然结构内节理裂隙未贯穿防突结构,但当隧道掌子面或隧道边墙等部位逐渐接近富水充泥致灾构造时,防突结构也逐渐变薄,同时在高压地下水的作下,导致断续节理裂隙发生劈裂破坏,即断续节理在高压地下水楔劈作用下沿末端发生扩展,裂隙之间逐渐相互联系贯通,并逐渐形成多个切穿防突结构的裂隙,最终形成突水通道。

3.4 块状破碎防突结构关键块失稳分析

块状碎裂结构主要为受构造影响严重的破碎岩

层,主要发育于断层、断层破碎带、片理、层理及层间结构,裂隙结构面间距0.25~0.5 m,一般在3组以上(包括结构面),由许多分离体形成,采用如图17所示的概化模型对其突水模式进行分析。

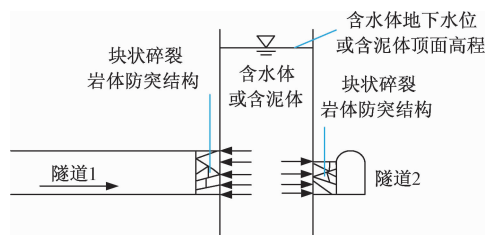


图17 块状破碎防突结构模型

Fig. 17 The structure model of massive fractured rock mass

由图17可知:当防突结构为块状碎裂结构时,由于岩体的破碎程度很大,完整性很差,导致防突结构的整体强度很低。当隧道掌子面、拱部或边墙逐渐接近富水致灾构造时,块状碎裂防突结构受到爆破开挖的扰动以及应力释放,导致关键块体失稳,在高压地下水的作下,导致其他块体变形或崩溃,最终形成突水突泥通道。

3.5 土石间架防突结构渗透破坏分析

土石间架结构主要存在于压性断层上盘强烈挤压破碎带或充填于竖向发育的岩溶管道底部,破碎岩块之间夹杂粘土介质形成的地质结构,采用图18所示的概化模型对其突水模式进行分析。

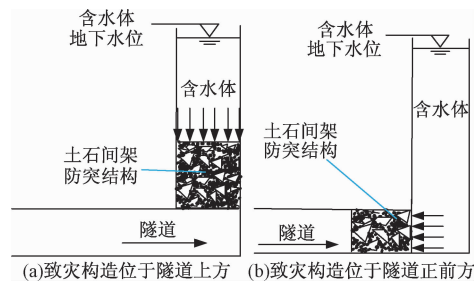


图18 土石间架防突结构模型

Fig. 18 The structure model of earth-rock inter-frame

由图18可知:对于土石间架防突结构,其渗透性较强,并且在地下水的长期侵蚀作下,导致破碎岩块之间的充填介质软化,当隧道揭露该类防突结构时,增强了地下水在结构内的渗流作,在持续渗流和工程扰动的共同作下发生管涌和流土现象,破碎块体间的细颗粒逐渐流失,渗水量很小,但在持续渗流的冲刷作下,导致渗流通道逐渐扩大,涌水量逐渐增大,最终形成突水通道,导致大规模突水突泥。

3.6 致密散体防突结构整体滑移分析

致密散体防突结构主要是指充填型致灾构造底部沉积的渗透性较低、整体性好的充填介质,是良好的隔水阻泥结构,采用如图 19 所示的概化模型对其突水模式进行分析。

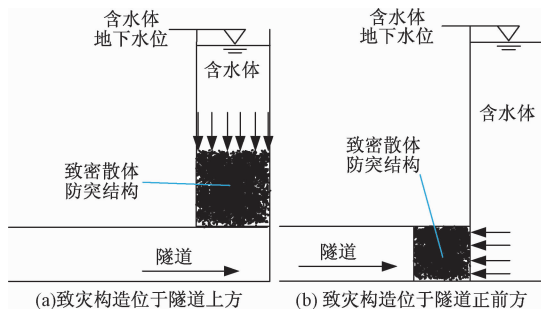


图 19 致密散体防突结构模型

Fig. 19 The structure model of dense granular

由图 19 可知:对于致密散体防突结构,由于其渗透性较弱,整体性强,因此,不会发生渗透破坏。当隧道开挖揭露充填介质时,该类防突结构主要是靠防突结构与管道壁之间的剪切力来维持稳定,由于管道壁的不平整性,导致充填介质与管道壁的接触面具有薄弱部位,在开挖扰动和上部高压地下水的共同作用下,这些薄弱部位形成导水通道,在地下水的润滑和冲蚀作用下,接触面的薄弱部位逐渐扩展,使防突结构沿接触面发生滑移剪切破坏的临界水压大大降低,最终导致防突结构整体滑移破坏,引发突水灾害。

4 工程实例

(1)圆梁山深埋特长隧道全长 11.068 km,最大埋深 700 多米,是重庆至怀化铁路的关键性控制工程。隧道穿越毛坝向斜核部、桐麻岭背斜和冷水河浅埋段,穿过三叠系、二叠系、泥盆系、志留系、奥陶系和寒武系等多种地层,主要发育有毛坝向斜、桐麻岭背斜及伴生断裂。正洞里程 DK354 + 460 ~ + 490 处发育有 2[#]溶洞,水压高达 2.73 MPa,溶洞两侧围岩节理和层面裂隙多充填黏土及粉细砂。平导 PDK354 + 435 揭示宽约 0.3 m 的溶蚀裂隙,向拱顶方向垂向延伸,涌水紫红色(图 20)。

下导 DK354 + 460 采用风钻钻孔时,由钻孔内射出高压水和大量粉细砂,射程约 30 m,随后采用地质钻机进行深孔探测,又发生喷砂,瞬时最大突水量达到 860 m³/h,下导坑施工完成后,又出现了高达 69 000 m³/h 的特大突水。经分析认为,致灾构造为高水压 2[#]溶洞,防突层结构是典型的土石间架结构,在高压岩溶水作用



图 20 PDK354 + 435 揭示 2[#]溶洞的宽约 0.3 m

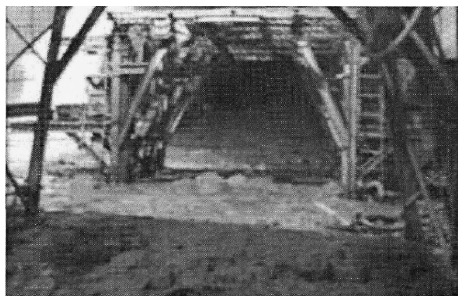
溶蚀裂隙发生紫红色涌水

Fig. 20 A 0.3 m wide vertical solution crack on the crown of the parallel pile, from which purplish-red water blasted out

下,围岩节理和层面裂隙填充的黏土和粉细砂不断流失,发生渗透破坏,最终导致致灾构造与隧道临空面之间的导水通道逐渐形成,从而引发突水灾害^[31-32]。

(2)钟家山隧道位于吉莲高速西段,采用分离式设计,左线长 2 486 m、右线长 2 494 m,是吉莲高速公路重要的控制性工程之一。隧址区处于湘东新华夏构造体系,永新盆地边缘,主要以砂页岩软弱地层为主,且发育有一条区域性逆冲断层:钟家山——界化垄断层(F3),该断层穿过隧道洞身,伴随发育多条小规模断层:F1、F2、F4 和 F5,并与隧道大角度相交。其中 F2 断层以页岩为主,岩体胶结松散,风化程度高,遇水容易崩解、软化、泥化成流塑状态,强度极低。另外, F2 断层具有良好的导水性,且水源丰富。F2 断层与隧道洞身交汇处围岩稳定性差,是典型的块状碎裂结构,在高压地下水的软化、泥化、润滑作用下,关键块体发生失稳破坏,导致其他块体发生较大变形或崩溃,多次发生大规模的突水灾害(图 21)^[33-34]。

(3)日本青函隧道是一条穿越津轻海峡的海底隧道,海底部分长约 23.3 km,其周围的地质特征是新生代沉积岩,存在十余个主断层和子断层,隧道开挖过程中遇到的四次重大特大突水事故均发生在断裂带处。其中 1976 年 5 月 6 日吉冈段的一条服务隧道在施工过程中发生的一次突水突泥灾害最为严重,该隧道在第 20 次开挖期间,从 B11 导向孔流出约 3.7 m³/min 的水,并排出约 4 m³ 的土,随后放弃第 20 次开挖转为第 21 次注浆加固,直到没有显著的涌水现象,认为可以恢复第 20 次开挖,结果发现掌子面围岩软化现象严重,并逐渐开始出现涌水现象,在两个小时内涌水速度从 0.9 m³/h 上升至 30 m³/h,约 11 h 后发生大规模的塌方和突水,总塌体积 1 000 m³,总突水量达到 1.845 × 10⁶ m³。勘察资料显示,突水点上覆岩体厚度 128 m,



(a) 隧道左洞ZK91+316第三次突水突泥



(b) 隧道右洞YK91+374第三次突水突泥

图21 钟家山隧道突水突泥灾害

Fig. 21 The water intrush and mud gushing in Zhongjiashan tunnel

上部海水深度 76 m, 突水点附近存在断层带, 岩层由沉积岩组成, 以凝灰岩为主要成分, 具有较低的渗透性, 经分析认为隧道开挖后形成临空面, 防突岩体在水的作用下发生软化和膨胀, 主要结构面的强度不断降低, 在高水头压力作用下防突岩体沿优势滑移面发生整体滑移破坏是导致突水突泥灾害发生的根本原因^[9]。

5 结论

(1) 通过对我国隧道建设环境特点及国内外三十多个典型隧道突水致灾构造和灾害特点的统计分析, 发现突水突泥灾害的规模受致灾构造的影响显著。本文结合隧址区突水致灾构造的不同成因, 将致灾构造分为断裂带、岩溶含水层、向背斜和单斜含水层、人工富水空间和地下不良地质体五大类。

(2) 根据各类致灾构造的不同表现形式, 提出了 13 个子类致灾构造: 断层型、层间断裂型、裂隙(溶隙)型、溶腔(溶洞)型、地下暗河型、岩溶管道型、背斜构造含水层、向斜构造含水层、单斜构造含水层、废弃矿巷、风化槽、含水砂层和侵入岩脉。

(3) 根据突水致灾构造与隧道临空面之间的围岩结构类型, 归纳总结了六类防突层结构: 完整岩体结构、层状碎裂岩体结构、断续岩体结构、块状碎裂岩体

结构、土石间架结构、致密散体结构; 根据防突层结构的破坏特点将隧道突水模式归纳为: 整体压裂破坏、剪切破坏、劈裂破坏、关键块失稳破坏、渗透破坏和整体滑移破坏。

(4) 通过对圆梁山隧道、钟家山隧道和青函隧道发生的典型突水突泥灾害进行详细分析, 其突水致灾构造、防突层结构类型和突水模式得到了有力的验证。

参考文献:

- [1] 卢耀如. 喀斯特发育机理与发展工程建设效应研究方向[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 419-432.
LU Yaoru. Karst development mechanism and research directions of developing engineering construction effect [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 419-432.
- [2] 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): 1297-1307.
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): 1297-1307.
- [3] 夏永旭. 我国公路隧道建设中的问题与对策[J]. 交通建设与管理, 2007(10): 45-51.
XIA Yongxu. The problems and countermeasures in the construction of highway tunnels in China [J]. Transportation Construction & Management, 2007(10): 45-51.
- [4] 张民庆, 刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水特征分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 422-426.
ZHANG Mingqing, LIU Zhaowei. The analysis on the features of karst water burst in the Yuanliangshan tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 422-426.
- [5] 金新锋, 夏日元, 梁彬. 宜万铁路马鹿箐隧道岩溶突水来源分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 71-74.
JIN Xinfeng, XIA Riyuan, LIANG Bin. Analysis of bursting water source of Maluqing tunnel, Yichang-Wanzhou railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2): 71-74.
- [6] 郭佳奇, 王光勇, 任连伟. 宜万铁路岩溶地质特征及其发育模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 72-78.

- GUO Jiaqi, WANG Guangyong, REN Lianwei. Karst geological features of Yiwan line and their basic modes [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 72 – 78.
- [7] 卓越,孙国庆. 齐岳山隧道 F11 高压富水断层带注浆施工技术 [J]. 中国工程科学, 2009, 11(12): 82 – 86.
- ZHUO Yue, SUN Guoqing. Grouting construction technology of high pressure and rich water fault F11 in Qiyueshan Tunnel [J]. Engineering Sciences, 2009, 11(12): 82 – 86.
- [8] 陈禹成,田伯科. 麻武高速公路大别山隧道涌水原因及治理措施探讨 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2011(4): 36 – 38.
- CHEN Yucheng, TIAN Boke. Discussion on the causes of gushing water in Dabie Mountain Tunnel of Ma-Wu Highway and the treatment measures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology), 2011(4): 36 – 38.
- [9] Tsuji H, Sawada T, Takizawa M. Extraordinary inundation accidents in the Seikan undersea tunnel [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(1): 1 – 14.
- [10] Wallis S. Freezing under the sea rescues Oslofjord highway tunnel [J]. Tunnel, 1999, 8: 19 – 26.
- [11] LU Yaoru, LIU Qi, ZHANG Feng' e. Environmental characteristics of karst in China and their effect on engineering [J]. Carbonates Evaporites, 2013, 28(1): 251 – 258.
- [12] LI Xiaozhao, CAO Liang, ZHAO Xiaobao. Assessment of potential impact of tunneling on the groundwater in epi-fissure-karst-zone and ecological environment [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(3): 967 – 976.
- [13] ZHAO Yong, LI Pengfei, TIAN Siming. Prevention and treatment technologies of railway tunnel water inrush and mud gushing in China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(6): 468 – 477.
- [14] 蒙彦,雷明堂. 岩溶区隧道涌水研究现状及建议 [J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 287 – 292.
- MENG Yan, LEI Mingtang. The advance and suggestion for the study on discharge rate in karst tunnel gushing [J]. Carsologica Sinica, 2003, 22(4): 287 – 292.
- [15] 王建秀,杨立中,何静. 大型地下工程岩溶涌 (突) 水模式的水文地质分析及其工程应用 [J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(4): 49 – 52.
- WANG Jianxiu, YANG Lizhong, HE Jing. Hydrogeological analysis and engineering application of typical styles of karst groundwater's blow (bursting) in large-scale underground engineering [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001, 28(4): 49 – 52.
- [16] Song K I, 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, s 135 – 136(7): 92 – 105.
- [17] 邹立,万军伟,陈刚,等. 宜万铁路野三关隧道“8·5”突水事故成因分析 [J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 212 – 218.
- WU Li, WAN Junwei, CHEN Gang, et al. Cause of the “8·5” water burst incident at Yesanguan tunnel along the Yi-Wan railway [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(2): 212 – 218.
- [18] 周毅. 隧道充填型管道构造突涌水机理与预测预警及工程应用 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- ZHOU Yi. Study on water inrush mechanism and early warning of filled piping-type disaster and its engineering application in tunnels [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [19] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机理与风险控制及工程应用 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- SHI Shaoshuai. Study on seepage failure mechanism and risk control of water inrush induced by filled disaster structure in deep-long tunnel and engineering applications [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [20] 罗雄文,何发亮. 深长隧道突水致灾构造及其突水模式研究 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 21 – 25, 53.
- LUO Xiongwen, HE Faliang. A study of geological structures inclined to disaster and models of water burst in deep-buried long tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 21 – 25, 53.
- [21] 李新宇,张顶立,房倩,等. 越江跨海隧道突水模式研究 [J]. 现代隧道技术, 2015, 52(4): 24 – 31.
- LI Xinyu, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. On waterburst patterns in underwater tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(4): 24 – 31.
- [22] 中国隧道工程学术研究综述 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1 – 65.

- Review on China's tunnel engineering research[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 1-65.
- [23] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2161-2172.
- WANG Mengshu. Development status and technical difficulties of underwater traffic tunnels——discussion on the “construction scheme of tunnels of the Taiwan Strait Submarine Railway”[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2161-2172.
- [24] WANG Taitien, JENG Fushu, LO Wei. Mitigating large water ingresses into the New Yungchuen Tunnel, Taiwan[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(2): 173-186.
- [25] Wenner, Dieter, Eng. -Geol. MSc, et al. Alborz Service Tunnel in Iran: TBM Tunnelling in Difficult Ground Conditions and its Solutions[C]// Proceeding of 8th Iranian Tunneling Conference, 2009.
- [26] 石文慧. 当代铁路隧道发展趋势及地质灾害[J]. 铁道工程学报, 1996, (2): 54-61.
- SHI Wenhui. Development trend of contemporary railway tunnel and its geological hazard control[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1996, (2): 54-61.
- [27] 牟传文. 日本上越新干线控制工程——大清水隧道贯通[J]. 中国铁路, 1979, (14): 11.
- MOU Chuanwen. Japan joetsu shinkansen control engineering——dai shimizu railway tunnel run-through completely[J]. Chinese Railways, 1979, (14): 11.
- [28] 王鹰, 陈强, 魏有仪, 等. 岩溶发育区深埋隧道水岩相互作用机理[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 56-59.
- WANG Ying, CHEN Qiang, WEI Youyi, et al. Water/Rock interaction mechanism in deep-buried tunnels in karst area[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 56-59.
- [29] 何发亮, 吴德胜, 郭如军, 等. 隧道施工: 地质灾害与致灾构造及其致灾模式[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
- HE Faliang, WU Desheng, GUO Rujun, et al. Tunnel construction: geological disasters and disaster-causing structures and their disaster-causing model [M]. Chendu: Southwest Jiaotong University Press, 2015.
- [30] 宋浩然. 钻爆法海底隧道突水机理及其应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- SONG Haoran. Water inrush mechanism of subsea tunnel constructed by drill-blasting method and its application [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [31] 张民庆, 孙国庆, 邹冲, 等. 圆梁山隧道 2# 溶洞正洞施工技术[J]. 铁道工程学报, 2004, (4): 68-76.
- ZHANG Mingqing, SUN Guoqing, ZOU Chong, et al. Construction technique for main cave of No. 2 karst cave of Yuanliangshan tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, (4): 68-76.
- [32] 张倬元, 蒋良文. 倒虹吸形成深饱水带大型充填溶洞的典型实例[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 455-469.
- ZHANG Zhuoyuan, JIANG Liangwen. A typical case history of infilled karstic caves formed by reverse siphonic circulation in deep phreatic zone[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 455-469.
- [33] 范威, 王川, 金晓文, 等. 吉莲高速公路钟家山隧道涌突水条件分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 38-43.
- FAN Wei, WANG Chuan, JIN Xiaowen, et al. Water inrush condition analysis of the Zhongjiashan tunnel in the Jilian Highway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 38-43.
- [34] 翁贤杰. 富水断层破碎带隧道突水突泥机理及注浆治理技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- WENG Xianjie. Study on inrush of water and mud mechanism and grouting control technology in water-rich fault fracture zone of tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2014.