

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0123

张强,曾开帅,张宇,等.红层地区飞仙关隧道特大涌水模型试验[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):166-171. ZHANG Q, ZENG K S, ZANG Y, et al. Model simulation test for large-scale water inflow in Feixianguan tunnel in Red Bed area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 166-171. (in Chinese)

红层地区飞仙关隧道特大涌水模型试验

张强¹, 曾开帅¹, 张宇¹, 何文君¹, 邵江², 彭琪¹

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 成都 610041)

摘要:大型隧道涌水常发生于岩溶发育地区,在传统认为缺水、贫水的红层地区实属罕见。飞仙关隧道作为雅康高速公路关键性控制工程之一,在施工至 K23+708 标段时发生特大涌突水,涌水量高达 1.74×10^6 mL/s,经过一个周期性涌水,稳定流量约为 3.48×10^5 mL/s。以飞仙关隧道为例,结合前人对隧道涌水的水化学分析成果,采用自主研发的专门用于模拟隧道涌水过程的渗流试验槽装置,将飞仙关隧道 K23+658~883 段(225 m)原型按一定比例缩小为模型,选取飞仙关向斜两个典型剖面进行物理模拟试验。通过对试验涌水量的拟合分析,对比隧道实测涌水特征,验证了顺层顺轴向、顺层绕轴向两种涌水模式,确定了涌水来源与通道。试验结果表明该模型稳定可靠,研究方法 & 结果对今后类似工程的研究具有指导和借鉴意义。

关键词:红层隧道;大型涌突水;物理模拟;涌水量;试验

中图分类号:U455;P642 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Model simulation test for large-scale water inflow in Feixianguan tunnel in Red Bed area

ZHANG Qiang¹, ZENG Kaishuai¹, ZANG Yu¹, HE Wenjun¹, SHAO Jiang², PENG Qi¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design And Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Water inrush from large tunnels often occurs in Karst areas, which are rare in red layers where water is traditionally considered to be poor. As one of the key control projects of Yakang Expressway, Feixianguan tunnel has a huge water inrush when it reaches the K23+708 tender section. The water inrush volume is up to 1.74×10^6 mL/s. After a periodic water inrush, the steady flow is about 3.48×10^5 mL/s. Taking the Feixianguan tunnel as an example, this paper combines the previous results of hydrochemical analysis of water gushing in the tunnel, using the self-developed percolation test slot device, which was specially used to simulate the process of tunnel water gushing, the prototype of K23+658~883 segment (225 m) of Feixianguan tunnel to a certain proportion as a model, and two typical sections of Feixianguan syncline were selected for physical simulation test. Through the fitting analysis of the test water inflow and the comparison of the characteristics of the measured water gushing in the tunnel, two kinds of water inrush modes of along the axis and around the axis were verified, and the source and channel of the water gushing were determined. The experimental results showed that the model was stable and reliable, and the research method and results may use as guidance and reference for the future research of similar projects.

Key words: red bed tunnel; large outburst water; physical simulation; water quantity; test

收稿日期:2019-04-05 修回日期:2019-05-30 网络出版时间:2019-06-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190612.1130.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(41472275);四川交通科技项目(2013 C10-2)

作者简介:张强(1971—),男,四川成都人,副教授,博士,主要从事地下水科学与工程方面的教学和研究工作。E-mail: zhangqiang-cdut@qq.com

通信作者:曾开帅(1993—),男,四川成都人,主要从事工程地质与水文地质方面研究。E-mail: 503017264@qq.com

随着我国社会、经济的快速发展,特长铁路、公路等隧道交通建设越发增多。在隧道施工过程中,当隧道穿过含水层或导水层时,往往会发生涌水现象,若施工前未探测到含水体的存在,甚至会发生突涌水,严重威胁到施工人员的生命安全及施工设备安全。譬如,马鹿箐隧道施工中先后发生 19 次严重涌水灾害,在铁路建设史上创造了瞬间涌水量的世界之最^[1-3];卡杨公路矮子沟隧道出现大量涌水,突水出喷时上部喷射距离为 23 m,稳定后喷射距离为 13 m,给工程施工造成了极大的困难(引自中华铁道网);青山隧道位于内昆铁路安(边)-梅(花山)段,在施工中多次发生涌水,最大涌水量 7.49×10^5 mL/s,因涌水被迫停工 12 次,共计 31 d^[4]。

从全国范围内研究成果来看,大规模涌水现象主要集中于岩溶隧道,针对隧道突涌水的研究也主要在于岩溶隧道以及断层破碎带等特殊构造隧道,对于普遍认为贫水、隔水的红层隧道,其研究成果几乎为零^[5-8]。本文通过对雅康高速飞仙关隧道发生的红层大规模突涌水现象,开展物理模拟试验研究、再现隧道突涌水全过程,采用“紊流-层流”型流量方程分段拟合,验证了飞仙关隧道大规模涌水来源于地表水且存在褶皱构造控制下的顺轴顺层、绕轴顺层两种补给模式,填补了国内对于红层区隧道突涌水物理模拟试验研究空白。

1 工程背景

本文以雅康高速公路飞仙关隧道 K23+658 至 K23+883 段(225 m)为研究对象,隧道全长 4 995 m,最大埋深约 819 m。飞仙关隧道穿越地层主要有中生界白垩系下统夹关组(K_{1j})中-厚层状粉砂岩、中生界白垩系上统灌口组(K_{2g})薄-中厚层状粉砂质泥岩。其中粉砂质泥岩层为相对隔水岩层,粉砂岩层为相对含水岩层;砂岩泥岩互层的结构形成了隧址区多层含水结构的特殊状态。隧道涌水点高程约为 677 m,埋深 316 m,位于灌口组粉砂质泥岩与夹关组粉砂岩地层交界处,为本次物理模拟试验主要还原地层。隧道所在范围内地表水系发育,南北向茱经河及芦山河与东西向始阳河及青衣江相交,在空间上大致呈十字形分布,距离隧道西南侧约 3 km,建有乐英水库,库水位高程(651.5 m),距离隧道较远的茱经河上游建丁村坝水库,库水位高程(699.25 m)。区域内整体地势南高北低,地下水以大气降水补给为主,地表流水补给为辅,向地势低洼处径流排泄,北侧青衣江作为研究区的一个排泄基准面。受北西—南东向构造应力挤压,研究区主要

发育茱经河向斜、新开店断层。该向斜由茱经河切割其核部,近南北走向,向斜南端隆起,隧道涌水点处于近核部位置。飞仙关隧道水文地质概况见图 1。

2015 年 9 月 20 日凌晨,飞仙关隧道右洞掌子面上台阶在施工至 K23+708 时,从左侧拱脚和侧壁发生涌突水,涌突水发生时隧道底部产生瞬时高压,造成底板岩体隆起,台架发生严重变形。初期涌水量达 $1.62 \sim 1.74 \times 10^6$ mL/s,经过一个周期性涌水,隧道涌水量相对稳定,流量约为 4.87×10^5 mL/s,截至 2016 年 3 月,隧道涌水量仍有 $2.32 \sim 3.48 \times 10^5$ mL/s。孟庆鑫等^[9]通过系统聚类分析和微量元素示踪,证明飞仙关隧道涌水与茱经河、始阳河河水存在较大关联,笔者通过物理模拟试验对此加以佐证。



图 1 飞仙关隧道水文地质概况

Fig. 1 Hydrogeological survey of Feixianguan Tunnel

2 物理模拟试验

2.1 试验装置及材料

本次物理模拟试验采用的渗流试验槽装置是自主研发的专门用于模拟隧道涌水过程的物理模拟试验装置,主要由模型箱、储水箱、隧道、测压管、水泵、给水排水溢流箱等部分组成(图 2)。



图 2 物理模型箱实物图

Fig. 2 Physical model box

根据流固耦合相似原理,模型的边界条件、几何尺寸、荷载及相似材料的容重、强度、变形特性及水利特征均需满足相似规律。通过连续介质的流固耦

合数学模型推导出关系式^[10-11]为

$$C_G = \frac{C_u}{C_l^2} = C_\lambda \frac{C_e}{C_l} = C_G \frac{C_e}{C_l} = C_\gamma = C_\rho \frac{C_u}{C_l^2} \quad (1)$$

式中： C_G 为剪切弹性模量相似比尺； C_u 为位移相似比尺； C_l 为几何相似比尺； C_λ 为拉梅常数相似比尺； C_γ 为容重相似比尺； C_e 为体积应变相似比尺； C_ρ 为密度相似比尺； C_t 为时间相似比尺。

根据相似基本定理和流固耦合方程可以得到：模型相似 $C_G = C_\lambda$ ；几何相似 $C_u = C_e C_l$ ，由 $C_e = 1$ ，则有 $C_u = C_l$ ；时间相似 $\frac{C_u C_G}{C_l^2} = \frac{C_e C_u}{C_l^2}$ ，则 $C_t = \sqrt{C_l}$ 。根据几何相似 $C_x = C_y = C_z = C_l$ ，得源汇项相似 $C_w = 1/\sqrt{C_l}$ ；贮水系数相似 $C_s = 1/C_\gamma \sqrt{C_l}$ ；渗透系数相似 $C_k = \sqrt{C_l}/C_\gamma$ ；水压相似 $C_p = C_l C_\gamma$ ；根据因次分析法有渗水量相似 $C_q = C_k C_l^2$ 。其中， C_E 为弹性模量相似比尺； C_w 为源汇项相似比尺； C_s 为贮水系数相似比尺； C_k 为渗透系数相似比尺； C_q 为渗水量相似比尺^[12]。

由于本次物理模拟试验主要关注隧道涌突水发生时水压与流量变化情况，因此，选取可塑性强且渗透系数易于控制的石英砂。依据水文地质手册经验值，结合研究区水文地质勘察概况，经过大量的配比试验，选取渗透系数为 1 m/d(纯 80 目)的石英砂作为夹关组(K_{1j})砂岩的相似材料；选取渗透系数为 0.2 m/d(100 目 : 80 目 : 60 目 = 1 : 2 : 1)的石英砂作为灌口组(K_{2g})粉砂质泥岩的相似材料；选取渗透系数为 15 m/d(纯 60 目)的石英砂作为层间错动带强透水层的相似材料。通过物理相似关系可得模拟试验的几何尺寸，相似材料等主要参数见表 1。

表 1 主要相似比例参数汇总

Tab.1 Summary of main similar proportional parameters

参数	数值
长/m	2
模型箱尺寸	
宽/cm	45
高/cm	80
砂岩相似材料渗透系数(K_1)/(m·d ⁻¹)	1
泥岩相似材料渗透系数(K_2)/(m·d ⁻¹)	0.2
强透水层相似材料渗透系数(K_3)/(m·d ⁻¹)	15
渗透系数相似比尺	1 : 1
几何相似比尺(C_l)	1 : 2 000
容重相似比尺(C_γ)	1 : 1.52
时间相似比尺(C_t)	1 : 44.72
贮水系数相似比尺(C_s)	67.97 : 1
水压相似比尺(C_p)	1 : 3 040
渗水量相似比尺(C_q)	1 : 4 000 000

2.2 试验方案设计

飞仙关隧道在北西—南东的构造应力挤压下，泥岩发生塑性变形而砂岩发生脆性断裂，因此沿向斜轴向与垂直于轴向发育纵横交错的垂直张节理，这些宽大节理裂隙是构成隧道地下涌水的主要通道。笔者基于对隧址区地质条件、水文地质条件、隧道实测涌水量的动态数据分析，在当前具备的试验条件基础之上，提出顺层顺轴向、顺层绕轴向两种涌水模式物理试验探究方案。

顺层顺轴模式使用荣经河-青衣江剖面，顺层绕轴模式使用始阳河-青衣江剖面。两种模式涌水来源通道分别如图 1 中 A-A₁、B-B₁ 剖面线所示。试验箱长 2 m，由于模型箱自身限制，比例尺选取不能过大，但过小又影响试验准确性且不利于数据采集，因此采用 1 : 2 000 相似比例。同时由于模型箱体积受限，荣经河、始阳河一侧不能完全放入模型箱，因此选取地质体的一部分作为模拟对象，水流距离虽有所缩短但并不影响涌水特征的变化，顺层顺轴向、绕轴向涌水模拟概化见图 3、图 4。

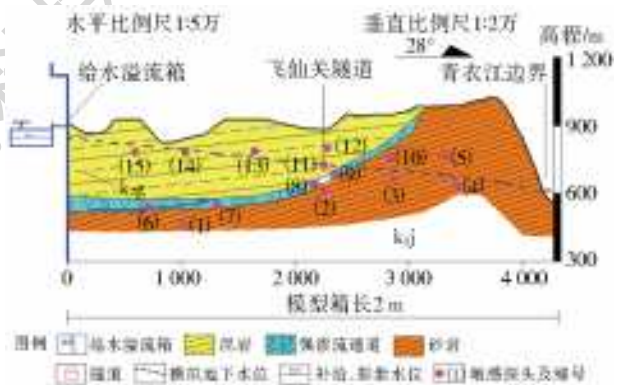


图 3 顺轴模式试验剖面概化

Fig.3 Profile generalization of paraxial model test

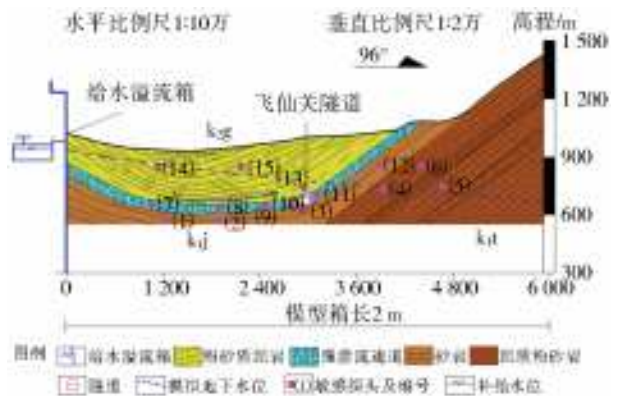


图 4 绕轴模式试验剖面概化

Fig.4 Profile generalization chart around the axis

根据钻孔实测资料，隧道突水点高程为 677 m。顺轴模式下地下水水位高程为 900 m，通过比例缩放，试验初始水位 23.75 cm，荣经河入渗区高程约

为 700 m,模拟稳定水位 13.75 cm。绕轴模式下地下水水位高程为 997 m,按比例缩放后试验初始水

位为 28.6 cm,始阳河入渗区高程为 857 m,模拟稳定水位 21.6 cm。缩放后水头参数汇总见表 2。

表 2 试验物理模型水位参数

Tab. 2 Water level parameters of physical model test

单位:cm

几何相似比尺(C_l)	试验组编号	顺轴模式初始水位	顺轴模式稳定水位	绕轴模式初始水位	绕轴模式稳定水位
1:2 000	1 试验组	23.75	13.75	28.60	21.60
	2 试验组(丰水期)	23.75	23.75	28.60	28.60
	3 试验组(平水期)	18.75	18.75	26.00	26.00
	4 试验组(枯水期)	13.75	13.75	21.60	21.60
	5 试验组(示踪)	23.75	23.75	28.60	28.60

2.3 模型试验过程

根据设计方案,试验过程如下:(1)清洗试验模型箱,确保箱体内无杂质后,使之自然风干。(2)选取不同渗透系数石英砂按一定比例放入微型电动搅拌机,进行配比试验,制作地层相似材料。(3)根据地质构造和地表起伏特征,在可视化有机玻璃表面按几何相似比尺(C_l)勾勒剖面形态,并标注传感器铺设位置。(4)根据剖面形态,将配比混合好的试验材料按地层岩性的不同填筑模型箱,不同地层采用透水性良好的尼龙纱网间隔,过程中不断加水、夯实,同时按预定位置铺设微型孔隙水压力传感器。(5)设置初始试验水头,模型箱进行饱水调试。(6)根据模拟内容的不同,分组进行试验。(7)打开隧道活塞,模拟隧道突涌水瞬时状态,完成涌水量、水压等变化数据采集。试验现场及搭建成果见图 5。



图 5 试验现场及搭建成果

Fig. 5 Test site and construction results

3 试验结果分析

3.1 涌水量数据拟合

飞仙关隧道初期实测涌水量达 1.74×10^6 mL/s,涌水 $q-t$ 曲线符合多亚动态性型泉水流量衰减方

程特点^[13]。根据实测涌水量衰减特征,将 $q-t$ 曲线分为 3 段:A 段衰减速度最大,由泉流量衰减方程研究可知,属于紊流状态;B 段较 A 段衰减速度减慢,由泉流量衰减方程研究可知,属层流状态;C 段不再衰减,因正值雨季,大气降水补给充分,流量上下波动,但整体已成稳定状态。根据试验涌水量结果分析,每组试验由于模拟内容不同,A1、B1 试验组采用前期不定水头,后期定水头的方式,其涌水特征与实际隧道涌水特征最为相似(见图 6),符合多亚动态性型泉水流量衰减方程特点,采用半对数坐标系(见图 7)、“紊流-层流”型泉流量方程分析顺轴、绕轴模式涌水 $q-t$ 曲线特点,其涌水衰减特征与隧道实测涌水衰减特征基本一致^[14-15]。

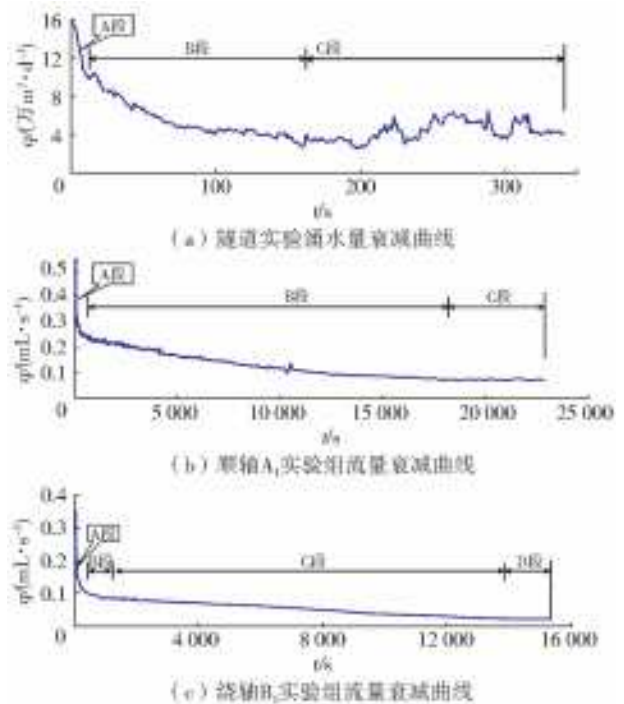


图 6 隧道实测、试验涌水量对比

Fig. 6 Contrast of measured and tested water inflow in tunnels

采用分段方式对试验涌水量拟合分析,顺轴模式涌水 $q-t$ 曲线分为 3 段,绕轴模式分为 4 段,根据“紊流-层流”型泉流量方程,顺轴、绕轴试验涌水衰

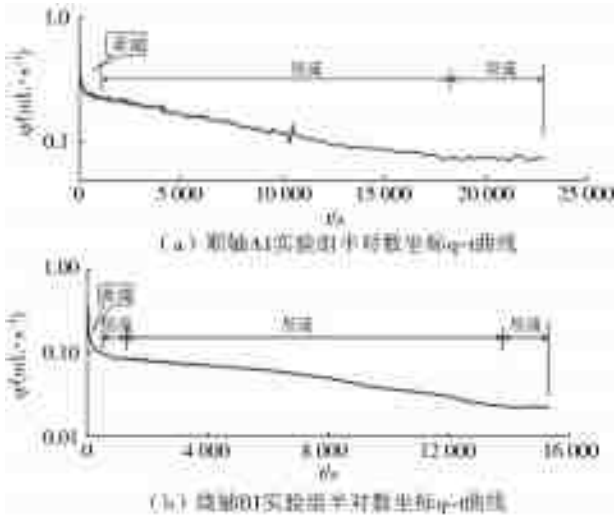


图 7 试验半对数坐标 $q-t$ 曲线

Fig. 7 Semi-logarithmic coordinate $q-t$ curve of the test

减方程可表达为

$$\begin{cases} Q_t = 0.688(1 - 0.0107t) & (0 \leq t \leq 48) \\ Q_t = 0.248e^{-0.00007t} & (48 \leq t \leq 18068) \\ Q_t = 0.075 & (18068 \leq t \leq 22847) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_t = 0.373(1 - 0.0089t) & (0 \leq t \leq 73) \\ Q_t = 0.133e^{-0.00053t} & (73 \leq t \leq 909) \\ Q_t = 0.1e^{-0.0001t} & (909 \leq t \leq 13326) \\ Q_t = 0.02255 & (13326 \leq t \leq 15358) \end{cases} \quad (3)$$

式中： Q_t 为任意时刻流量 (mL/s)； t 为衰减时间 (s)。

分析各组试验渗流过程及涌水量特征，总结可得如下：初始为不定水头，后定水头与隧道实测涌水量泉流量衰减特征更加符合，能较好地反应隧道涌水过程。试验隧道涌水初期，涌水大部分源于模型箱填筑体中静储量，在相对高水压力的促使下，水体迅速释放，涌水量呈现出快速衰减的现象，水流状态为紊流；隧道涌水中期衰减速度逐步减缓，模型箱填筑体中的静储量逐渐排泄减少，影响逐渐减小，地表河流影响逐渐显现，地表河流补给逐渐成为主要涌水水源，随着时间变化涌水量逐渐趋于稳定；隧道涌水后期涌水量呈稳定状态，此时模型箱填筑体中地下水静储量已经排空，隧道涌水来源于河流补给。

3.2 试验、实测涌水量对比分析

根据试验测得的涌水量数据，顺轴模式 A1 试验组的初始涌水量为 0.555 mL/s，稳定时涌水量为 0.075 mL/s；B1 试验组的初始涌水量为 0.353 mL/s，稳定时涌水量为 0.022 mL/s。已知模型渗水量相似比例尺 C_q 为 $(1/2000)^2$ ，计算得出顺轴模式初始涌水量为 2.23×10^6 mL/s，稳定时涌水量为 3×10^5 mL/s；绕轴模式初始涌水量为 1.42×10^6 mL/s，

稳定时涌水量为 9.05×10^4 mL/s。

试验中初始流量都是模拟地质体中天然静储量引发的隧道涌水量，两种模式共同参与这一过程，故可取其平均值，为 1.82×10^6 mL/s；物理模拟试验中，两种模式达到稳定时相互之间彼此独立，影响较小，共同作为隧道涌水流量来源，物理试验所得稳定涌水量为 3.90×10^5 mL/s。

根据隧道涌水量实测数据可知隧道初始涌水量为 1.81×10^6 mL/s，隧道稳定涌水量为 3.83×10^5 mL/s。试验数据与实测数据之间良好吻合，说明模型能够很好地模拟飞仙关隧道。根据模拟试验稳定涌水量换算实际涌水量，隧道涌水稳定后，以顺轴模式为主要来源约占涌水量 76.79%，绕轴模式为次要来源约占涌水量 23.21%。由此可知，顺轴方向地下水通道更为顺畅，对隧道形成更好的补给；绕轴方向地下水通道较阻塞，对隧道涌水补给较少。

4 结论

(1) 物理模拟试验与实际地质体之间有很好的吻合，是对地质体进行了真实的再现与模拟，本次试验过程真实可信，所得数据真实可靠。

(2) 飞仙关隧道涌水与地表河流存在水力联系，主要通过层间错动带向隧道排泄，涌水初期主要为山体静储量排泄，随着静储量的排空，逐渐向远处袭夺，涌水以地表河流荣经河、始阳河水作为涌水来源。

(3) 飞仙关隧道涌水过程中存在优势通道，荣经河以顺层顺轴向涌水模式作为主要涌水来源，约占涌水量 76.79%，始阳河以顺层绕轴向涌水模式作为次要涌水来源，约占涌水量 23.21%。

(4) 红层区并非传统意思上的贫水区，在地质条件复杂的情况下也可能发生大规模涌水，并且涌水特征与岩溶区涌水特征存在显著差异。

参考文献 (References):

[1] 张旭东,汪海滨,封明君,等. 释能降压工法在高压富水岩溶隧道风险规避中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2782-2791. (ZHANG X D, WANG H B, FENG M J, et al. Study of the application of energy releasing and pressure reducing aim to evade risk in water-enriched high hydraulic pressure latent karst tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2782-2791. (in Chinese))

[2] 黄润秋,王贤能,陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573-576. (HUANG R Q, WANG X N, CHEN L S. Hydro-splitting off analysis on underground water in

- deep-lying tunnels and its effect on water gushing out [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 573-576. (in Chinese))
- [3] 赖金星,樊浩博,申爱军. 基于流固耦合的富水软岩地层隧道排水方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 349-353. (LAI J X, FAN H B, SHEN A J. Study on the drainage scheme of water-rich soft rock tunnel based on solid-fluid coupling[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 349-353. (in Chinese))
- [4] 姚云晓. 青山隧道涌水原因分析及治理措施[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(3): 118-119. (YAO Y X. Cause analysis and treatment measures of water gushing in Qingshan tunnel[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, 17(3): 118-119. (in Chinese))
- [5] 王克忠,李仲奎. 深埋长大引水隧洞三维物理模型渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 725-731. (WANG K Z, LI Z K. Study on 3d physical model test of seepage of deep-buried long and large diversion tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 725-731. (in Chinese))
- [6] 蔚立元,李术才,徐帮树,等. 水下隧道流固耦合模型试验与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1467-1474. (WEI L Y, LI S C, XU B S, et al. Study of solid-fluid coupling model test and numerical analysis of underwater tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1467-1474. (in Chinese))
- [7] 沈泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(5): 32-35. (SHEN T. Development of geomechanic model experiment techniques[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(5): 32-35. (in Chinese))
- [8] 华罗庚,宋健. 模型与实体[J]. 系统工程与电子技术, 1980(8): 1-2. (HUA L G, SONG J. Models and entities [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 1980(8): 1-2. (in Chinese))
- [9] 孟庆鑫. 雅康高速飞仙关红层隧道特大涌突水机理分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. (MENG Q X. The research of the large water inrush mechanism of Feixianguan Tunnel in Yakang Highway[D]. Chengdu, Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [10] 李树忱,冯现大,李术才,等. 新型固流耦合相似材料的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 281-288. (LI S C, FENG X D, LI S C, et al. Research and development of a new similar material for solid-fluid coupling and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 281-288. (in Chinese))
- [11] 胡耀青,赵阳升,杨栋. 三维固流耦合相似模拟理论与方法[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2007, 26(2): 204-206. (HU Y Q, ZHAO Y S, YANG D. Simulation theory and method of 3D solid-liquid coupling[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(2): 204-206. (in Chinese))
- [12] 李术才,王凯,李利平. 海底隧道新型可拓展突水模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2409-2418. (LI S C, WANG K, LI L P. Development and application of an extendable model test system for water inrush simulation in subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2409-2418. (in Chinese))
- [13] 汤邦义. 多亚动态型泉水流量衰减方程的探讨[J]. 勘察科学技术, 1984(5): 10-15. (TANG B Y. Discussions on the flow attenuation equation of multi-sub-dynamic springs[J]. Site Investigation Science and Technology, 1984(5): 10-15. (in Chinese))
- [14] 董贵明,束龙仓. 地下水流量衰减方程研究进展及展望[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 45-51. (DONG G M, SHU L C. Research progress and prospects of groundwater flow attenuation equation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 45-51. (in Chinese))
- [15] 张强,陈丽影,赵敏,等. 红层隧道涌水流量衰减曲线特征分析——以雅康公路飞仙关隧道为例[J]. 人民长江, 2017, 48(1): 48-49. (ZHANG Q, CHEN L Y, ZHAO M, et al. Analysis of tunnel water gushing attenuation curve characteristics in red bed: Case of Feixianguan Tunnel on Yakang Highway[J]. Yangtze River, 2017, 48(1): 48-49. (in Chinese))