

DOI: 10.11779/CJGE201703004

断层破碎带隧道突水突泥模型试验系统研制与应用

张庆松, 王德明, 李术才, 张 霄, 谭英华, 王 凯

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250000)

摘 要: 为研究吉莲高速永莲隧道扰动作用下突水突泥灾变演化过程及破坏特征, 以 F2 断层破碎带为研究对象, 研制大型三维地质模型试验系统, 该系统由模型架、地应力加载系统、水压加载系统以及信息监测系统组成, 通过材料配比试验及物理力学性能参数测试, 研制出适用于流-固耦合模型试验的新型断层围岩及正常围岩相似材料。采用该系统进行模型试验, 揭示正常围岩开挖过程中及揭露断层后的隧道围岩渗流压力、应力应变、位移以及涌出物等特征参数的变化规律, 模型试验结果与实际工程灾变特征具有较好一致性。试验结果表明该系统稳定可靠, 可广泛应用于其它地下工程的模型试验研究, 其研究方法对类似工程研究具有一定的指导和借鉴意义。

关键词: 断层破碎带; 突水突泥; 灾变演化; 相似材料; 模型试验

中图分类号: TU41; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)03-0417-10

作者简介: 张庆松(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害预报与防治方面的教学与研究工作。E-mail: zhangqingsong@sdu.edu.cn。

Development and application of model test system for inrush of water and mud of tunnel in fault rupture zone

ZHANG Qing-song, WANG De-ming, LI Shu-cai, ZHANG Xiao, TAN Ying-hua, WANG Kai

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250000, China)

Abstract: In order to study disaster evolutionary process and failure characteristics of Yonglian tunnel of Ji'an-Lianhua highway under the effect of disturbance, taking F2 fault fracture zone as the research object, a large-scale 3D geologic model test system is developed. The system consists of model bench, geostress loading system, hydraulic loading system and information monitoring system. A new type of similar material of fault and surrounding rock used in the solid-fluid coupling model tests is developed through tests on a large number of different material ratios and physical and mechanical performance parameters. The test system and similar material are used to simulate the hazard of inrush of water and mud. The change rules of seepage pressure, stress-strain, displacement and floodier in the process of excavation for common and fault surrounding rock. The results of model test agree with the catastrophic characteristics of actual projects perfectly. The system is stable and reliable, and it can be widely used for model tests in other underground projects. The research methods and the results are of certain guiding significance to the practical engineering.

Key words: fault rupture zone; inrush of water and mud; disaster evolution; similar material; model test

0 引 言

突水突泥作为一种复杂的动力灾害现象, 已成为隧道穿越断层破碎带时的主要地质灾害。断层带岩体裂隙发育, 胶结性差, 以富水高压、松散破碎为主, 含水体内介质强度极低, 隧道围岩在受到开挖扰动后, 出现应力释放以及地下水渗流路径改变等现象, 在满足灾害启动条件后, 隧道就会发生突水突泥。

江西吉莲高速永莲隧道穿越 F1~F4 断层破碎带过程中遇到大量富水软弱破碎介质而发生突水突泥灾害, 其中 F2 断层地质条件尤为复杂, 对工程造成的影响也最为突出。通过还原永莲隧道突水突泥灾害过

程, 掌握隧道穿越断层破碎带时的灾变时效规律, 并系统分析其致灾机理。

由于断层破碎带复杂的构造成因及赋存条件, 理论研究及数值模拟有其自身的局限性, 而现场试验对于数据的采集存在较大困难且严重威胁试验人员的人身安全, 因此都难以取得突破性进展。地质模型试验作为一种重要的研究手段, 能够全面、真实地反映地质灾变体与洞室的空间关系, 准确模拟隧道、巷道等

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0801600); 国家自然科学基金项目(41272385); 教育部博士点基金项目(20130131110032)

收稿日期: 2016-04-11

地下工程的施工过程,获得岩体介质的变形破坏特征,在解决地下工程灾害问题时具有不可替代的重要作用,能够真实准确地再现突水突泥灾变演化过程,试验结果较数值模拟更为接近实际工程,使人们能够直观的得到围岩的受力特征以及变形规律,为研究断层破碎带隧道突水突泥致灾机理奠定基础。

目前,隧道、矿山以及水利等地下工程利用模型试验展开了众多的研究,朱维申等^[1]研制了三维模型试验台架装置,实现全三轴应力状态下在侧向施加梯级荷载,研究了围岩破坏的发展过程;张强勇等^[2]研制出一种高地应力真三维加载地质力学模型试验系统,并有效模拟出深部巷道围岩分区破裂的非线性变形破坏现象;姜耀东等^[3]研制了一种新型真三轴巷道平面模型试验台,开展了大量复杂条件下巷道稳定性的模型试验;刘爱华等^[4]研制了深部开采承压突水机制相似物理模型试验系统,实现深部采矿时复杂应力、水压力及采动影响等联合作用下岩体的受力、变形和破坏过程;李术才等^[5]研制了大比尺三维模型试验系统,真实模拟了隧道在开挖和支护过程中不断变化的力学过程;高魁等^[6]建立了煤与瓦斯突出试验平台,进行了石门揭构造软煤的相似模拟试验,研究了石门揭构造软煤过程中煤岩应力和位移的变化规律。但是,针对断层破碎带隧道突水突泥灾害相关地质力学模型试验的研究相对匮乏,使用上述模型试验系统进行断层破碎带突水突泥灾害研究主要存在以下问题亟待解决:模型尺寸较小,无法进行大比尺试验,存在明显的边界效应;多集中在地应力作用下隧道开挖过程中围岩的稳定性研究,未考虑断层破碎带岩体在地下水与开挖扰动综合作用下的灾变演化过程;对断层破碎带充填介质相似材料的研究较少,目前的流-固耦合相似材料大多仅考虑密度、尺寸等物理指标,同时满足固体力学性质及渗透性的相似材料极少^[7],更少有同时将正常岩体与断层岩体两种不同特性的相似材料应用于同一试验中。

为使用地质模型试验方法对永莲隧道突水突泥灾害进行研究,最大限度还原灾害发生过程,本文针对现有模型试验系统的不足,研制了一种新型三维地质模型试验系统,该系统具有如下特点:在高地应力及高水压作用下具备较好的稳定性及密封性,可进行大比例试验;能够模拟不同地质条件下的试验过程且能够在试验过程中随时调整地应力及水压力,对不同类型试验具有较好的适应性;能够监测隧道开挖过程中的土压力、渗透压力、应变以及位移等参数的变化。配以适用于流-固耦合模型试验的新型断层及正常围岩相似材料,围绕断层破碎带隧道在开挖过程中,尤其是断层处的临灾破坏机制展开试验研究,通过监测

信息探明在地下水持续作用下渗流压力、涌出物质量、应力应变以及围岩变形等参数的动态变化规律。

1 模型试验

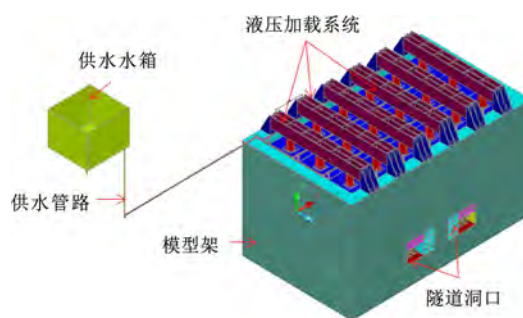
1.1 模型试验系统研制

模型试验系统由试验模型架、地应力加载系统、水压加载系统以及信息监测系统4部分组成。地应力加载系统可提供试验环境所需的地应力;水压加载系统可提供试验所需的压力水头;信息监测系统由数据传感器、监测软件以及静态电阻应变仪组成,如图1所示。

(1) 模型试验架

地质模型试验架的主体材料为钢筋混凝土材料,由钢筋混凝土框架、钢制密封板及隧道洞口组成,内部空间尺寸为:长×宽×高=8 m×4.5 m×5 m,两侧分别设置若干引线孔及带阀门的排水(气)孔。隧道洞口由高强度钢化玻璃挡土板及可拆卸钢隔板组成,改变钢隔板的组合方式可进行不同比尺的模型试验,钢隔板之间使用高强螺栓进行连接。为使上部反力梁、墙体及基础形成合理的受力体系,在基础和墙体内设置工字钢梁、柱,与上部反力梁组成封闭成环的加载系统。

框架墙体的厚度为500 mm,基础采用500 mm厚的平板式筏板基础,在墙体内部涂抹聚氨酯进行防水,工序为:2 cm水泥砂浆找平层为1.5 cm聚氨酯为2 cm水泥砂浆面层。



(a) 三维示意图



(b) 模型实物图

图1 地质力学模型试验系统

Fig. 1 Geomechanics model test system

(2) 液压加载控制系统

采用的液压加载系统可实现自动控制液压, 能够实现非均匀加载, 即单独控制每个千斤顶的运行, 液压加载控制系统稳定性较好, 稳压时间长^[8-9]。该液压加载系统由液压控制站、液压千斤顶、高压油泵、油箱、分油器、液压传感器等组成。沿模型架的纵向布置6道箱型式加载反力梁, 每道反力梁下设置3个液压千斤顶, 如图2所示。



(a) 反力梁及液压千斤顶



(b) 液压控制站

图2 液压加载控制系统

Fig. 2 Hydraulic loading control system

(3) 水压加载装置

由于实验室内空间限制, 将供水水箱设置在室外, 设置高为7 m的钢架, 将水箱置于钢架上, 水箱储水量为12 m³, 尺寸为长×宽×高=3 m×2 m×2 m。在供水水箱1.5 m高度处设置带有阀门的溢流管, 根据试验水位高度调整阀门, 保证试验所需水压。试验时使用液位传感器及光柱水位显示器对供水水箱内水位变化情况进行观测, 如图3所示。



图3 供水系统

Fig. 3 Water supply system

1.2 工程背景

泉宁高速江西段(吉安—莲花)永莲隧道设计为

双向分离式隧道, 隧道开挖断面高度为9.06 m, 宽度为12.6 m, 单洞长约2.6 km, 隧道平均埋深180 m, 地下水位距离隧道拱顶约150 m, 岩体松散破碎, 隧址区地层岩性种类多, 地下水丰富, 水力联系路径复杂, 区域内主要接受大气降水的补给, 降水渗入断层破碎带内补给地下水后, 受地形地貌及岩体裂隙发育控制, 隧道进口施工至F2断层时发生大规模塌方、突水突泥灾害。F2断层地表穿经ZK91+350部位, 走向SSE, 与隧道轴线45°相交, 倾向E, 倾角84°, 宽度15~35 m, 查明延伸长度520 m, 带内岩体以断层泥为主, 含水率高, 地表表现形式为沟谷, 在地质探查过程中发现隧道左洞右侧存在不良地质含水水体, 含水体内介质强度极低。正常围岩段则主要以泥岩、页岩为主, 具有较好的导水能力, 遇水不崩解。

1.3 模型试验系统的应用

为系统研究断层岩体各物理场响应规律, 本试验对应现场位置选取左洞ZK91+310—ZK91+400为模型试验段, 其中断层段为ZK91+340—ZK91+364, 断层两侧为正常围岩段。

为减小模型边界效应对试验结果的影响, 试验选取相似比尺为1:20, 根据相似原理, 除几何尺寸外, 还要求模型的应力状态、边界条件以及相似材料的物理特性^[10]及水理特性均遵循相似规律。

根据量纲分析法及弹性力学基本方程并结合流-固耦合理论, 推导出以下相似关系^[11-14]:

相同量纲物理量相似比尺相等, 且量纲为一的相似比尺等于1, 则

$$C_{\mu} = C_{\varepsilon} = C_{\varphi} = 1, \quad (1)$$

$$C_{\sigma} = C_{\sigma_c} = C_E = C_c. \quad (2)$$

由原型及模型的平衡方程可推导相似关系为

$$\frac{C_L C_{\gamma}}{C_{\sigma}} = 1. \quad (3)$$

根据几何方程、物理方程、应力边界条件和位移边界条件可推导相似关系为

$$\frac{C_{\delta}}{C_{\varepsilon} C_L} = 1, \quad (4)$$

$$\frac{C_{\sigma}}{C_{\varepsilon} C_E} = 1. \quad (5)$$

根据均匀连续介质的流-固耦合数学模型推导了流-固耦合相似理论, 得出相应相似关系为

$$C_K = \frac{\sqrt{C_L}}{C_{\gamma}}, \quad (6)$$

式(1)~(6)中: C_{μ} 为泊松比相似比尺, C_{ε} 为应变相似比尺, C_{φ} 为摩擦角相似比尺, C_{σ} 为应力相似比尺, C_{σ_c} 为抗压强度相似比尺, C_E 为弹性模量相似比尺。

表 1 原岩及模型材料的物理力学参数

Table1 Physico-mechanical parameters of prototype and model materials						
材料类型	密度 $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗压强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
正常岩体原状	2.43~2.56	15~20	3~5	$4.86\times 10^{-3}\sim 1.02\times 10^{-2}$	113.62~171.74	34~39
正常岩体相似	2.43~2.56	0.75~1	0.15~0.25	$2.43\times 10^{-4}\sim 5.1\times 10^{-4}$	113.62~171.74	34~39
断层岩体原状	1.94~2.05	6~10	0.8~1.0	$4.95\times 10^{-4}\sim 2.18\times 10^{-3}$	105.03~145.5	36~42
断层岩体相似	1.94~2.05	0.3~0.5	0.04~0.05	$2.475\times 10^{-5}\sim 1.09\times 10^{-4}$	105.03~145.5	36~42

尺, C_c 为黏聚力相似比尺, C_L 为几何相似比尺, C_γ 为重度相似比尺, C_K 为渗透系数相似比尺。

根据上述理论, 试验采用的几何相似比为 1/20, 应力相似比为 1/20, 材料重度、黏聚力以及内摩擦角的相似比为 1/1, 抗压强度 σ_c , 弹性模量 E , 渗透系数 K 的相似比均为 1/20。

为最大限度利用模型试验内部空间, 选取试验原型尺寸为: 长×宽×高=160 m×90 m×180 m, 根据相似比尺, 洞口尺寸为高×宽=0.45 m×0.63 m, 隧道形式为曲墙式, 试验模型隧道上覆岩体厚度应为 9 m, 实际厚度为 2.9 m, 不足部分的地应力由液压加载系统进行补偿; 试验供水系统提供的最高水位高度为 8.5 m, 根据相似比, 本次试验水位高度为 7.5 m。

(1) 相似材料

对于断层破碎带隧道流-固耦合相似模拟试验, 模拟的难点在于对相似材料性质的控制, 其直接影响试验结果的真实性。本次试验为实现大规模突水突泥, 正常围岩相似材料需具备在承压水作用下发生渗水同时能够维持自身强度的特性, 而断层围岩相似材料则要求在地下水作用下发生软化崩解, 因此, 需要重点控制相似材料的渗透系数和抗压强度。断层岩体的相似材料原岩样本取自断层破碎带中承载能力极低的不良地质体, 其遇水极易发生软化崩解; 断层两侧的正常岩体则具有一定的强度及透水性^[15], 对隧道原岩参数进行室内试验, 根据试验结果, 将相似材料分为正常岩体及断层岩体两部分分别进行研制, 原岩及相似材料的物理力学参数见表 1。

a) 正常岩体: 通过大量配比试验选定胶结剂为水泥和乳胶等非亲水性有机剂, 其中乳胶也作为一种调节剂, 砂、土和重晶石粉为骨料, 实现正常围岩段相似材料遇水不崩解等性质, 具体参数见表 2。

b) 断层岩体: 断层相似材料选定石蜡油作为胶结剂, 砂、土及粉煤灰为骨料, 配以拌合水, 实现断层相似材料遇水缓慢崩解弱化的性质, 具体参数见表 3。

表 2 正常岩体材料配比

Table 2 Material ratios of ordinary surrounding rock					
土砂比	灰水比	土晶比	骨胶比	砂灰比	水胶比
1.5 : 1	1.5 : 1	2 : 1	10 : 1	12 : 1	0.8 : 1

表 3 断层岩体材料配比

Table 3 Material ratios and physical mechanic parameter of fault surrounding rock

砂土比	水膏比	灰土比	骨胶比	水油比	砂膏比
3.1 : 1	0.8 : 1	2.2 : 1	3.5 : 1	3.5 : 1	6.3 : 1

通过改变组成材料中的一种或几种组分含量来控制材料的某项指标。对于断层岩体相似材料, 单轴抗压强度及渗透系数主要由液态石蜡来调节和控制, 黏聚力主要由煤粉灰控制; 对于正常岩体相似材料, 单轴抗压强度及弹性模量受胶结剂水泥、乳胶含量的影响, 黏聚力主要由乳胶及砂土比控制。

以表 1 及表 2 中的材料配比制作标准试件, 制作结束后在常温室干燥条件下^[16]养护 7 d 后, 进行室内实验得到表 4 所示的实验结果, 从表 4 中可以看出, 相似材料各参数均满足试验要求。

表 4 相似材料室内实验参数

Table 4 Laboratory test parameters of similar materials

材料类型	ρ $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	σ_c $/\text{MPa}$	E $/\text{GPa}$	k $/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	c $/\text{kPa}$	φ $/(^{\circ})$
正常岩体	2.49	0.91	0.22	4.91×10^{-4}	153.6	35
断层岩体	1.98	0.3	0.04	8.69×10^{-5}	113.4	39

(2) 模型体制作

设置 F2 断层与隧道轴线的角度为 85°, 倾角为 90°, 断层宽度为 1.2 m, 正常岩体与断层岩体的布设位置及尺寸见图 4 (a)。其中, 断层与隧道的角度和实际工程存在差异, 因本次试验是为获得断层破碎带隧道在扰动作用下物理场的时效响应规律, 大量试验表明, 该角度的变化对其影响较小。

按照相似材料配比配制材料, 模型体的填充采用分层填筑、逐层夯实的方式进行, 填筑过程中严格控制相似材料的密度。对于不良地质含水体的模拟, 材料填筑过程中, 在左右洞中间的预定位置埋设尺寸为长×宽×高=350 mm×300 mm×400 mm 的含水体, 含水体内部用粗砂进行充填, 其满足含水体高压、富水、无自稳能力、水源补给充足的要求, 并设置若干充填粗砂钢管作为导水裂隙及通道。材料填至模型架 4 m 高度处, 沿断层走向布置两根直径 200 mm 的供水管路与外部供水水箱相接。

(3) 监测点布置

材料填筑过程中, 在设计位置埋设各监测元件, 并通过引线孔将其集中连接至电阻应变仪。本次试验横向共布设 5 个监测断面, 纵向分别在洞周 (DJ0)、1 倍 (DJ1)、2 倍 (DJ2)、3 倍 (DJ3) 洞径位置布设 4 环监测点, 并在左右洞的中间位置加设元件。

埋设元件与材料填筑同时进行, 分别在隧道拱顶、拱肩、拱腰以及拱底等重点部位埋设位移传感器、土压传感器、渗压传感器以及应变砖, 具体监测断面及部分关键点元件位置布设如图 4 (b) 所示, 监测元件如图 5 所示。

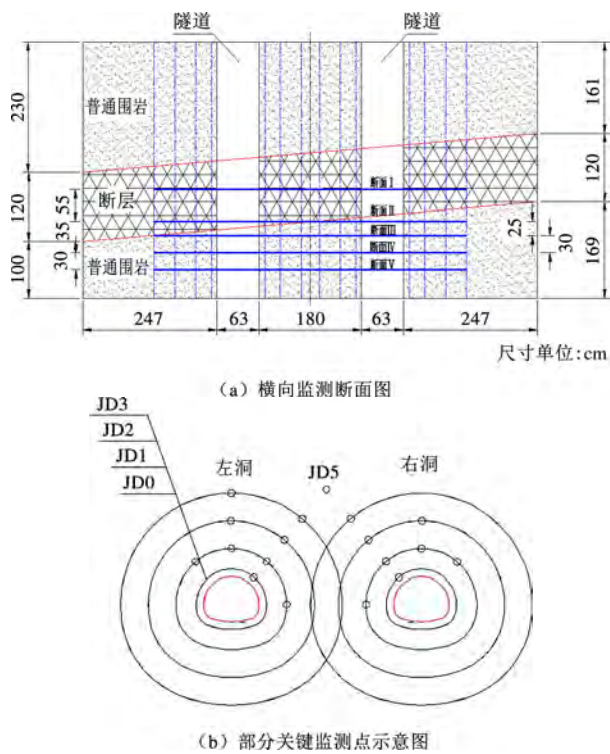


图 4 监测断面位置示意图

Fig. 4 Positions of monitoring sections

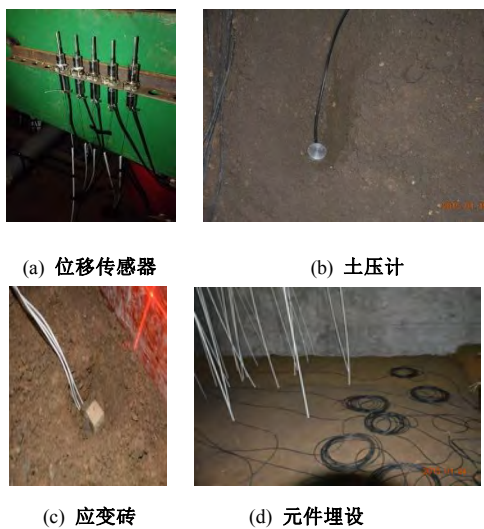


图 5 部分监测元件

Fig. 5 Part of monitoring components

模型体制作结束后, 进行模型顶部的密封, 依据试验设计参数, 使用液压控制站对模型体进行加载, 并开启供水系统向模型体内充水, 使模型填充材料在保水保压状态下养护 10 d, 地应力与水位高度基本稳定至与实际工程相同的初始状态后进行隧道开挖、支护及数据采集工作。

(4) 开挖及支护

本次试验以左洞为主要研究对象, 试验开挖过程中的主要监测数据为隧道围岩的位移、渗流压力、应力应变以及涌出物等特征参数, 通过各物理场的信息变化研究隧道系统的灾害时效响应规律。永莲隧道开挖至 F2 断层破碎带边界处附近发生突水突泥灾害, 已开挖正常围岩段已施作衬砌, 因此, 本次试验在正常围岩开挖段也设置了支护结构。按隧道实际开挖方法及进度, 根据相似原理对模型试验进行开挖, 采用超短台阶法开挖, 上台阶高度为 25.7 cm, 下台阶高度为 19.3 cm, 台阶长度为 40 cm, 相当于现场上下台阶距离 8 m, 每次进尺为 5 cm, 相当于现场进尺 1 m, 开挖后当上台阶开挖至 50 cm 后进行下台阶的开挖, 直至揭露断层。

下台阶开挖至 30 cm 处开始施作初次支护, 且每开挖 30 cm 进行一次支护, 直至断层边界处, 钢筋网片结构形状与隧道开挖轮廓线一致, 网片安装完毕后使用石膏及时初喷, 厚度约为 1 cm。下台阶开挖至 60 cm 时, 开始施作前两榀二次衬砌, 每榀长度为 25 cm, 开挖至 90 cm 时进行第三榀的施作。具体流程为: ①上(下)台阶开挖→②初次支护→③前两榀二次衬砌施作→④开挖→⑤第三榀二次衬砌施作→⑥剩余段开挖及初次支护。

试验开挖过程中不断向水箱内供水, 以保持水位高度不变。当开挖面完全揭露断层后, 停止开挖, 观察数据及隧道围岩变化情况, 直到断层围岩失稳破坏发生突水突泥灾害。



图 6 开挖及初支施作

Fig. 6 Excavation and construction of primary support

2 试验结果及分析

2.1 突水突泥过程

在隧道开挖初期的正常岩体段,拱顶有少量水渗出,并未形成较大导水通道且基本无固体颗粒物涌出,初期支护施作结束后渗水消失,掌子面局部出现湿润现象,如图6所示。开挖面揭露断层约27 min后,拱顶及掌子面渗水量呈缓慢增加的趋势,拱顶偏右位置出现股状涌水点,初始水量约为0.42 L/m,在地下水的持续作用下,该出水点范围不断增加,断层内泥化岩体被地下水流携带而出,水质较为浑浊^[17],掌子面开始出现泥化并掉块,随后发生小股涌泥(塌方),并造成破碎带岩体破坏范围的扩大,最终引发大规模突水突泥。随着断层破碎带内储存水量的快速流出,突水突泥量迅速衰减直至消失,隧道突水突泥灾害过程如图7所示。

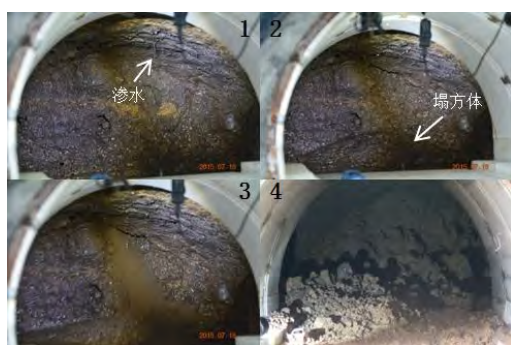


图7 突水突泥过程

Fig. 7 Process of inrush of water and mud

2.2 渗压变化

图8为开挖正常围岩段各监测断面1倍洞径拱顶渗流压力随开挖步的变化曲线,图9为揭露断层后各监测断面1倍洞径拱顶渗流压力随时间的变化曲线。从图中可以看出:

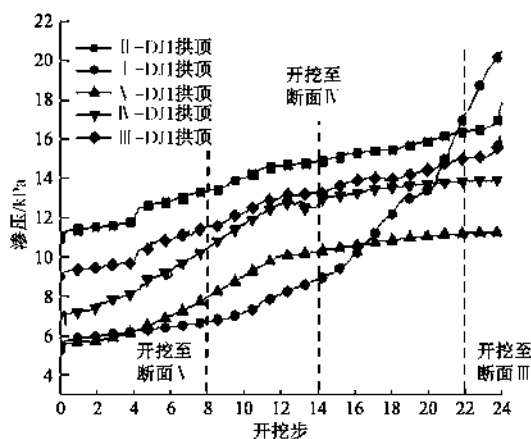


图8 渗压随开挖步的变化曲线

Fig. 8 Variation of seepage pressure with excavation step

(1) 随着隧道开挖面的不断推进,水力路径发生改变,各监测断面渗流压力均缓慢上升,越靠近断层渗压值越大,其中I断面变化幅度最大,开挖面通过

监测断面时各监测点未出现激变,表明正常围岩段的开挖对地下水渗流路径的改变是缓慢的,未发生突发性破坏。

(2) 开挖面通过监测断面III后,即在23—24开挖步附近,I、II、III监测点有所响应,IV、V断面监测点则仍较为平缓,表明掌子面越接近断层,渗压的改变越为明显。由图9可知,发生突水突泥灾害前后,距离断层较远的IV、V断面监测点渗流压力并未发生突跳,表明突水突泥灾害对远离断层的正常段围岩基本无影响。

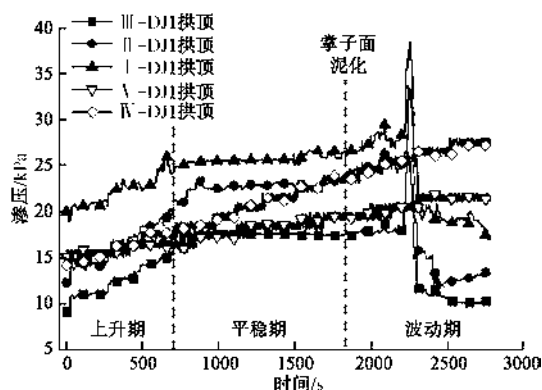


图9 揭露断层后渗压随时间的变化曲线

Fig. 9 Variation of seepage pressure with time after exposing fault

(3) 图9表明,揭露断层后渗流压力共经历“上升期—平稳期—波动期”3个阶段。上升期由于地下水对断层破碎带岩体流变性能的影响作用,断层岩体产生物理软化,孔隙率增大,造成围岩渗流压力逐渐增大;随着地下水的持续作用,约12 min后岩体弱化范围开始扩大,渗流压力变化较为平缓,此阶段为平稳期;揭露断层约31 min后,掌子面开始出现泥化、掉块现象,I、II、III断面渗压出现明显振荡,说明岩体结构性在发生变化。当断层岩体弱化严重,失去承载能力,渗流发生突变,压力迅速上升后突跳式下降,最终趋于稳定,形成稳定渗流场。

2.3 涌出物变化

揭露断层后对涌出物约15 s采集一次,由图10可以看出:

(1) 监测初期,随着渗流压力的增加,弱化岩土体被地下水携带而出,隧道围岩孔隙率逐渐增大,涌出物质量呈上升趋势,约10 min后涌出量较为稳定,分析认为这与渗流压力的稳定是相关的,突水突泥时涌出物质量达到峰值,表明水力梯度越大,对突水突泥影响越大。

(2) 突水突泥灾害发生之前,即图10中第145采集次开始,涌出物质量明显减小,此时隧道围岩结构性已破坏,岩土体被压实,介质孔隙率变小,土体

颗粒的运移作用受到阻碍, 导致涌出物减少。

(3) 当地下水继续渗透软化围岩, 伴随着渗透压力的降低, 隧道掌子面发生破坏, 大量地下水及固体物质涌入隧道, 涌出物聚然增加形成突水突泥灾害, 灾害发生后泥水质量迅速降低并趋于稳定。此时, 涌出物的变化与断层破碎带岩体的遇水崩解性及渗流压力大小紧密相关。

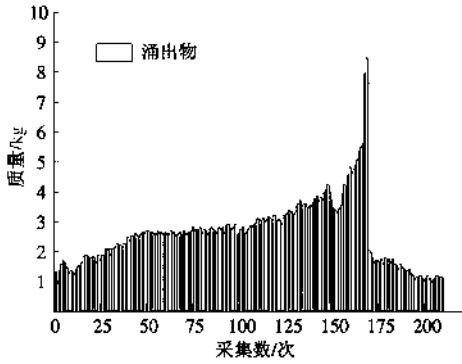
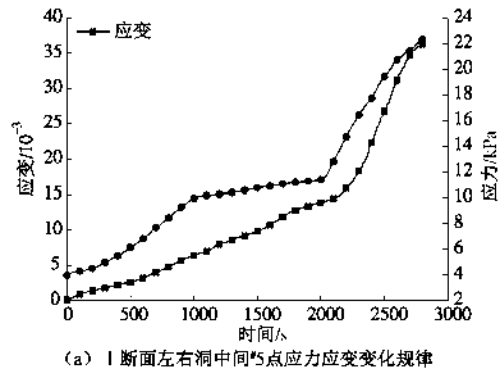


图 10 涌出物变化曲线

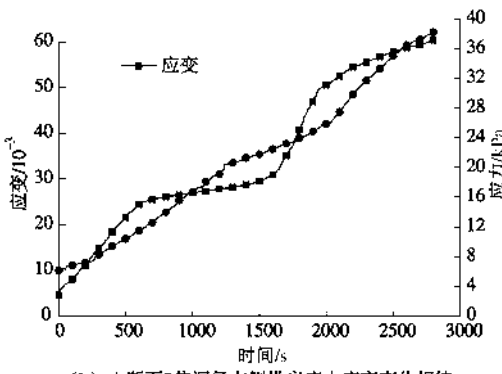
Fig. 10 Variation curves of floodor

2.4 应力应变变化

破碎带岩体的结构性及稳定性可以通过结构破坏、弱化后强度变化的大小反映出来, 因此, 可通过开挖过程中的应力应变变化规律分析岩体的变化特性。图 11 为揭露断层后的应力应变随时间的变化规律, 从图中可以看出:



(a) I 断面左右洞中间*5点应力应变变化规律



(b) I 断面3倍洞径右侧拱肩应力应变变化规律

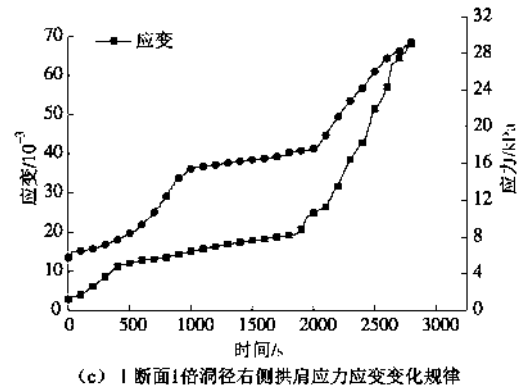


图 11 断层应力应变变化规律

Fig. 11 Stress-strain curves of fault

整体上断层岩体的应变随应力增大而增加, 越靠近开挖轮廓线应变值越大, 其总应变能就越大。DJ1 及 DJ3 比左右洞中间位置的 JD5 更早开始响应, 且 1 倍洞径右侧拱肩处应变与应力变化曲线基本一致, 表明断层破碎带岩体越靠近开挖轮廓线应变受应力变化影响越明显。

断层破碎带岩体所受应力越大, 在扰动作用下失稳破坏所需要的时间越少, 应变能越大的岩体, 其发生破坏引发突水突泥的可能性越大, 说明不同应力状态的岩体具有不同的稳定状态。断层破碎带岩体松散破碎, 隧道围岩稳定性差, 尤其在断层中设置了不良地质含水, 加速了该区域岩体的弱化及变形。因此, 隧道揭露断层破碎带停止开挖静置一定时间后, 在地应力及地下水的联合作用下, 低稳定状态的岩体会失稳并诱发突水突泥灾害, 这也是造成试验中突水突泥口位于隧道拱顶右侧的主要原因, 这一结论与实际情况是相符的。

2.5 位移变化

为清晰的表现出试验过程中隧道围岩各监测断面的位移变化情况, 选取隧道围岩拱顶位移进行分析, 图 12 为开挖正常围岩段各监测断面拱顶位移随开挖步的变化曲线, 图 13 为揭露断层后 I、IV 监测断面洞周及 3 倍洞径拱顶位移随时间的变化曲线。

由图 12 可知, 随着开挖面的不断推进, 各断面监测点位移缓慢增长, 靠近断层带位移增长速率较快, 变形值大, 表现为隧道拱顶的持续沉降, 在开挖面通过 IV 断面后 (约为第 16~18 开挖步), 拱顶沉降出现小幅波动后继续增长, 尤其 I、II 两断面受开挖影响较为明显, 距离断层带较远的 IV、V 两断面受影响程度则较小, V 断面则基本不受其影响, 分析认为衬砌结构对围岩位移的限制也是造成该现象的原因之一。

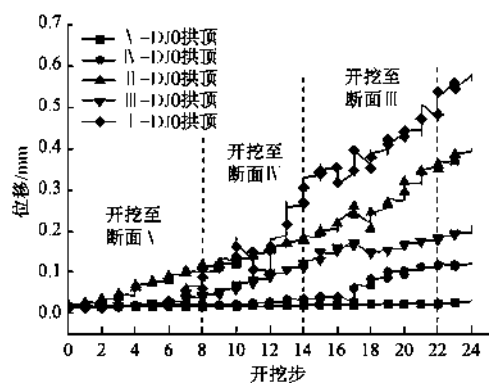


图 12 位移随开挖步的变化曲线

Fig. 12 Displacement-excavation step curves

由图 13 可知,灾害发生前各监测点均保持缓慢增长,发生突水突泥灾害时, I 断面洞周 (I-DJ0) 及 3 倍 (I-DJ3) 洞径拱顶位移发生跳跃式激增,而 IV 断面相应监测点的位移则表现平稳;图 12 及图 13 表明不论是在正常围岩开挖过程中还是揭露断层后,断层带岩土体的位移幅度均大于正常围岩断面,且越靠近断层带及隧道开挖轮廓线位移沉降值越大,突水突泥结束后,围岩重新达到相对稳定状态。

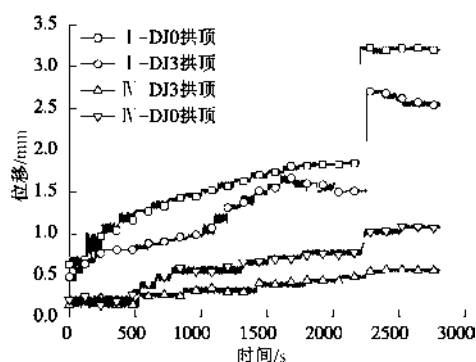


图 13 位移随时间的变化曲线

Fig. 13 Displacement-time curves

3 工程对比分析

相比模型试验条件,实际工程的地层岩体特性表现更为复杂多变,从上文叙述中可知,本次试验所研制相似材料的物理力学特征以及水理力学特征均满足其各自模拟岩体的特征要求。下面对实际工程突水突泥灾害取得的相关数据与模型试验结果进行对比分析,以验证模型试验系统以及试验数据的可靠性。

3.1 突水突泥过程

当隧道掘进至 F2 断层破碎带后,开挖扰动改变了隧道影响区域内的地下水渗流场,增大了隧道围岩的渗透性,地下水向深部张开裂隙渗流,断层破碎带岩体不断充水饱和。断层岩体在地下水的渗流过程中发生弱化和泥化作用,岩体的强度随时间的增长呈指数衰减的趋势,在饱水一定时间后,断层岩体强度的

衰减速率加快,此时,岩体内产生大量裂纹,孔隙率大幅增加。隧道上部 F2 断层破碎带内形成高水力梯度的渗流通道,高压渗流使岩体发生潜蚀作用,隧道围岩开始变形,随后左洞 K91+338 位置隧道拱顶右侧出现松动塌垮现象,并伴有小股涌水。隧道围岩的变形以该出水点为突破口,断层土体颗粒在水流作用下不断被带出,最终形成直径 1 m 左右的不规则圆形突水突泥口 (见图 14),在高压水头作用下,大量泥水呈喷射状涌出,引发突水突泥灾害 (见图 15)。随着泥化岩体和断层破碎带内储存的地下水大量涌出,泥水量迅速减小并呈自然流出状态,模型试验的灾害过程与此过程是一致的。

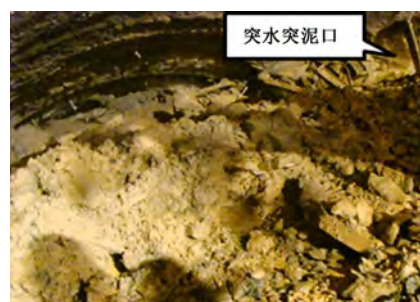


图 14 突水突泥口位置

Fig. 14 Location of inrush of water and mud



图 15 突泥堆积体

Fig. 15 Inrush of water and mud deposit

3.2 涌出物变化

永莲隧道揭露断层后对掌子面涌出物情况进行观察 (见图 16),从现场采集的部分数据可知,随着时间的增长,涌出物逐渐增大,在灾害发生前,涌出物体积出现波动,时大时小且水质极为浑浊,短小时内出现明显下降现象,该结果在试验中也得到了验证。灾害发生时涌出物体积骤然增大,随后迅速回落,经现场评估,10 min 内涌出泥水体积共约 3000 m³,灾后堆积在开挖面附近的突出物约 1200 m³,对淤泥堆积体进行清理时发现泥水涌出,约 40 m³/h,随后缓慢减小并保持在 5 m³/h。

3.3 位移变化

图 17 为隧道开挖至 F2 断层破碎带后靠近断层的正常围岩段及断层围岩拱顶位置的位移变化。可以看

出, 同一时刻的断层围岩位移增长速率比正常围岩更快, 在突水突泥灾害发生时, 断层围岩的位移出现激增, 而正常围岩段拱顶位移受灾害影响则相对较小, 只在突水突泥时发生了较小增加。



图 16 现场涌出物观察点

Fig. 16 Location of flood in engineering field

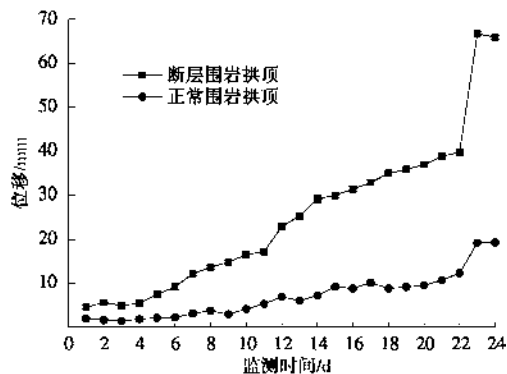


图 17 围岩实际位移变化曲线

Fig. 17 Curves of actual displacement of surrounding rock

4 结 论

(1) 针对永莲隧道工程特点, 研制了断层破碎带隧道突水突泥模型试验系统, 通过大量材料配比及相关参数测试, 获得了物理力学性能及水理特性满足模型试验要求的正常岩体及断层岩体两种相似材料, 并进行试验还原隧道灾害发生过程。

(2) 隧道开挖后, 围岩渗流压力随工作面的推进逐渐增加, 揭露断层后围岩在地下水的不断弱化作用下, 断层围岩的渗流压力经历了“上升期—平稳期—波动期”3个阶段, 而正常围岩段的渗流压力全过程表现平稳。

(3) 突水突泥灾变过程中, 隧道围岩的位移、涌出物以及应力应变等参数均有明显的阶段特征, 其变化规律反映了灾害的形成、发展以及致灾的演化过程, 试验突水突泥过程与实际工程较为吻合, 为永莲隧道及类似工程的灾害预警提供了一定的指导作用。

参考文献:

[1] 朱维申, 张乾兵, 李 勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质

力学模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 1 - 7. (ZHU Wei-shen, ZHANG Qian-bing, LI Yong, et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true triaxial loading and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 1 - 7. (in Chinese))

[2] 张强勇, 陈旭光, 林 波, 等. 高地应力真三维加载模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1587 - 1593. (ZHANG Qiang-yong, CHEN Xu-guang, LIN Bo, et al. Development and application of high-geostress true 3D loading geomechanics model test system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1587 - 1593. (in Chinese))

[3] 姜耀东, 王 涛, 宋义敏, 等. 煤岩组合结构失稳滑动过程的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 177 - 182. (JIANG Yao-dong, WANG Tao, SONG Yi-min, et al. Experimental study on the stick-slip process of coal-rock composite samples[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 177 - 182. (in Chinese))

[4] 刘爱华, 彭述权, 李夕兵, 等. 深部开采承压突水机制相似物理模型试验系统研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1335 - 1341. (LIU Ai-hua, PENG Shu-quan, LI Xi-bing, et al. Development and application of similar physical model experiment system for water inrush mechanism in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1335 - 1341. (in Chinese))

[5] 李术才, 刘 钦, 李利平, 等. 隧道施工过程大比尺模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1368 - 1374. (LI Shu-cai, LIU Qin, LI Li-ping, et al. Development of large-scale geomechanical model test system for tunnel construction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1368 - 1374. (in Chinese))

[6] 高 魁, 刘泽功, 刘 健. 基于相似模拟和地质力学模型试验的突出装置研制及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 711 - 718. (GAO Kui, LIU Ze-gong, LIU Jian. Design of outburst experiment device based on similar simulation and geomechanical model test and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 711 - 718. (in Chinese))

[7] 李利平. 高风险岩溶隧道突水突泥灾变演化机理及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2009. (LI Li-ping. Study on catastrophe evolution mechanism of karst water inrush and its engineering application of high risk karst tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese))

- [8] 杨 敏, 李德宁, 楼晓明, 等. 土体三轴加卸荷对桩基影响模型试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 411 - 416. (YANG Min, LI De-ning, LOU Xiao-ming, et al. Development and application of simulation system for model piles impacted by soil triaxial loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(2): 411 - 416. (in Chinese))
- [9] 陈旭光, 张强勇, 段 抗, 等. 数控气压式柔性加载模型试验系统的研制及应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, **44**(1): 50 - 55. (CHEN Xu-guang, ZHANG Qiang-yong, DUAN Kang, et al. Development of digital controlling air pressure flexible loading model test system and its application[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2012, **44**(1): 50 - 55. (in Chinese))
- [10] 徐前卫, 朱合华, 丁文其, 等. 软弱岩体中隧道开挖的落门模型试验研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(增刊 2): 26 - 30. (XU Qian-wei, ZHU He-hua, DING Wen-qi, et al. Study on the trapdoor model experiment of tunnel excavation in weak surrounding rock mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(S2): 26 - 30. (in Chinese))
- [11] 张强勇, 李术才, 李 勇, 等. 大型分岔隧道围岩稳定与支护三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 2): 4051 - 4059. (ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, LI Yong, et al. 3D geomechanical model test research on stability and supporting for surrounding rock mass of a large-scale diversion tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 4051 - 4059. (in Chinese))
- [12] 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. (YU Li-yuan, LI Shu-cai, XU Bang-shu, 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))
- [13] 王家臣, 李见波, 徐高明. 导水陷落柱突水模拟试验台研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, **27**(3): 305 - 309. (WANG Jia-chen, LI Jian-bo, XU Gao-ming. Development and application of simulation test system for water inrush from the water-conducting collapse column[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, **27**(3): 305 - 309. (in Chinese))
- [14] 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 Shu-chen, FENG Xian-da, LI Shu-cai, 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))
- [15] 周丁恒, 曹力桥, 房师涛, 等. 特大断面隧道支护结构现场试验与三维效应分析[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(2): 136 - 142. (ZHOU Ding-heng, CAO Li-qiao, FANG Shi-tao, et al. In-situ test and 3D-effect analysis of a tunnel lining structure of large cross section[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(2): 136 - 142. (in Chinese))
- [16] 袁宗盼, 陈新民, 袁 媛, 等. 地质力学模型相似材料配比的正交试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, **34**(2): 197 - 202. (YUAN Zong-pan, CHEN Xin-min, YUAN Yuan, et al. Study on ratio of similar material of geomechanical model based on orthogonal test[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, **34**(2): 197 - 202. (in Chinese))
- [17] 张志强, 阚 呈, 孙 飞, 等. 碎屑流地层隧道发生灾变的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(12): 2451 - 2457. (ZHANG Zhi-qiang, KAN Cheng, SUN Fei, et al. Experimental study of catastrophic behavior for natm tunnel in debris flow strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(12): 2451 - 2457. (in Chinese))