

粉细砂地层隧道涌水涌砂灾害模型试验研究

杨 祥

(中铁建华南建设有限公司, 510545, 广州//高级工程师)

摘 要 近年来盾构在一些大埋深高压砂层、砂卵石地层掘进时,因隧道内涌水涌砂而诱导的地层坍塌事故时有发生,因此亟需进一步探究隧道涌水涌砂的成灾机理与地层坍塌的破坏过程,为类似工程提供施工指导。基于已有工程案例,设计了隧道涌水涌砂可视化试验装置,研究了水土流失质量和土层横向破坏形态随时间的变化规律,并探讨了粉细砂密实度、模型隧道埋深、地下水位和漏点位置四种因素对隧道涌水涌砂灾害的影响。试验结果表明:盾构隧道涌水涌砂灾害可大致分为三个阶段,即漏水漏砂阶段、快速涌砂阶段和突水破坏阶段,可采用流失水土干物质比作为判别隧道涌水涌砂灾害发展阶段的依据;漏点位置和地下水位对地层渗透破坏的演化过程影响较大;粉细砂密实度越小、隧道埋深越浅、地下水位距地面越近且漏点位于隧道下方时,隧道涌水涌砂灾害发展越剧烈,水土流失质量越大。建议盾构在大埋深富水地层掘进过程中,做好地层加固方案,同时加强隧道,尤其是隧道拱底位置处的防水能力。

关键词 盾构隧道;涌水涌砂;漏点位置;地下水位;隧道埋深

中图分类号 U451+.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.040

Model Test of Tunnel Water and Sand Inrush Disaster in Silty Fine Sand Stratum

YANG Xiang

Abstract In recent years, when shield is tunneling in some large buried-depth and high water pressure sand layers and sandy gravel layers, stratum collapse accidents induced by tunnel water and sand inrush have been reoccurring. Therefore, it is urgent to further explore the disaster mechanism of tunnel water and sand inrush and the damage process of stratum collapse, providing construction guidance for similar projects. Based on existing engineering cases, a visual test device for tunnel water and sand gushing is designed to study the evolution law of soil and water loss quality and seepage damage of stratum. Besides, the influence of compactness of silty fine sand, buried depth of model tunnel, groundwater level and leakage point position are also discussed. The experimental results show that: (1) The disaster can be roughly divided into

three stages: water and sand leakage stage, rapid sand gushing stage and water inrush damage stage. What's more, the dry matter ratio of soil and water loss parameter is proposed as the basis for judging the development stage of tunnel water and sand inrush disaster; (2) The leakage location and groundwater level have great influence on the evolution process of formation seepage failure; (3) It is found that when the leakage spot is below the tunnel, the water and sand inrush disaster is more severe with a smaller silty sand compactness, a shallower tunnel buried depth and a higher water level height, and the water and soil loss mass is greater. It is recommended that during the excavation process of shield tunneling in large buried-depth water rich strata, a good ground reinforcement plan be made, while strengthening the waterproof capacity of the tunnel, especially at the arch bottom of the tunnel.

Key words shield tunnel; water and sand inrush; leakage spot location; groundwater level; tunnel buried depth

Author's address China Railway Construction South China Construction Co., Ltd., 510545, Guangzhou, China

0 引言

盾构机在富水粉细砂层等地层掘进时,易发生盾尾刷失效从而引发漏水漏砂问题。若不及时处理,漏水漏砂会逐步演化为大规模的涌水涌砂灾害,造成周围地层的渗透破坏和流动变形,进而引起地面塌陷及不均匀沉降等,对施工人员生命财产安全威胁极大。

目前,关于土体渗透破坏,国内外学者在管涌发展机理^[1]、影响管涌因素^[2]和管涌渗漏通道特征^[3]等方面开展了大量研究,然而关于因盾尾渗漏引起的隧道涌水涌砂的灾害机理和周围地层渗透破坏的演化过程研究却非常缺乏。涌水涌砂灾害按土体的胶结特性、渗透特性等可划分为滑移失稳型、渗透破坏型和溃砂涌水型^[4-6]。盾尾刷失效时,粉细砂地层在渗流作用下将发生类似于管涌或流土形式的渗透破坏,由此诱发的隧道涌水涌砂灾害

显然属于渗透破坏型,故本文主要针对该类型涌水涌砂灾害开展研究。

文献[7]设计了突水涌砂装置,并根据砂的不均匀系数确定了砂的渗透变形形式。文献[8]通过研究确定了土样涌水涌砂的临界水力梯度,并将土样发生渗透破坏的形式分为不突水不涌砂、突水不涌砂、潜蚀不涌砂、突水涌砂4种模式。文献[9]借助于CT扫描开展涌水涌砂研究,指出土体均匀系数和曲率系数是空洞能否产生的决定因素。文献[10]研究了间断级配砂土在不同饱和度、水位、砂土级配以及涌口尺寸下发生渗流侵蚀时砂土流失量和最终侵蚀状态的变化规律。

综上所述,众多学者通过模型试验对地下工程涌水涌砂灾害类型、破坏阶段以及破坏形式进行了大量研究,但研究的主要是地下管线涌水涌砂、弱胶结岩层突水等灾害的发展过程,针对盾构隧道涌水涌砂方面的相关研究较少。

本文通过开展模型试验,研究了隧道涌水涌砂灾害引起的水土流失质量、地层渗透破坏以及地面沉降变形的演化过程,并探讨了粉细砂密实度、隧道埋深、地下水位以及漏点位置对隧道涌水涌砂灾害的影响。研究结果可为不良地质条件下盾构机的掘进安全提供参考。

1 试验装置及试验方法

1.1 试验模型箱

试验几何相似比为60,据此设计了一套隧道涌水涌砂灾害可视化试验装置。试验装置尺寸如图1所示。

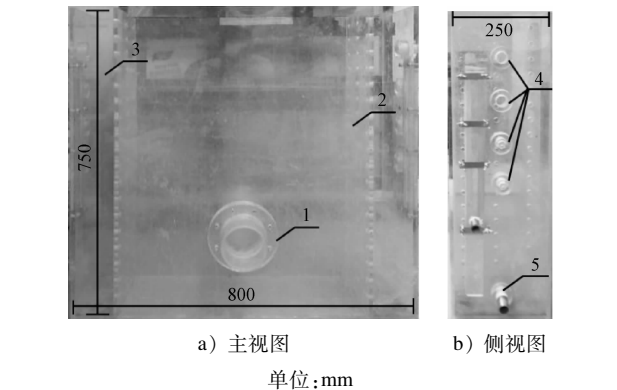


图1 试验模型箱
Fig. 1 Test model box

试验模型箱可分为模拟地层的土槽和模拟地

下水的水槽。两侧水槽各长100 mm,且外壁均有进水孔和溢流孔,溢流孔保证水位在试验过程中恒定。

试验模型箱长为800 mm,以此降低装置边界效应的影响。同时距试验模型箱底部150 mm处开有 $\phi 100$ mm的孔洞,用来安装模型隧道,并进一步降低装置底部边界效应的影响。在试验模型箱纵向开有 $\phi 100$ mm的孔洞,将整个隧道涌水涌砂过程假设为二维平面处理。

1.2 试验材料

本试验采用120目河砂来模拟地层,该砂样呈灰褐色。在砂样干燥条件下对其进行筛分试验,并绘制砂样的级配曲线,如图2所示。为了探讨地层密实度对隧道渗漏的影响,设计不同密实度的砂样作为模拟地层,其主要物理力学参数如表1所示。尽管本文采用的试验砂土在整个试验过程中难以满足全程水力相似、本构相似等条件,但是本文重点关注隧道渗漏的演变与机理,该类砂样级配曲线特征明显,细颗粒易在水力作用下发生迁移,贴合本文研究目的,因此采用该类砂样作为试验模拟地层。

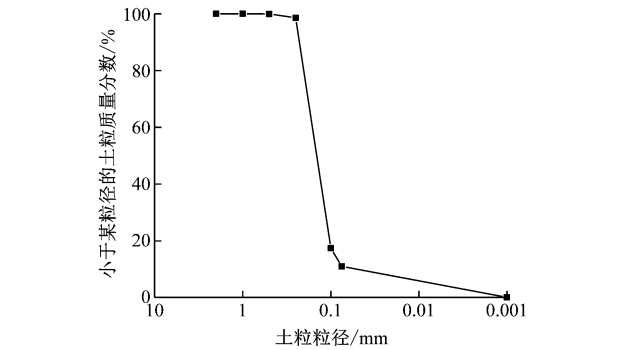


图2 试验砂样的粒径分布曲线
Fig. 2 Particle size grading curve of test sand sample

表1 试验砂样的主要物理力学参数
Tab. 1 Main physical and mechanical parameters of test sand sample

试验砂样	密度/ (g/cm ³)	不均匀系数	曲率系数	内摩擦角/ (°)
细砂 A	1.5	2.43	1.42	27.4
细砂 B	1.4	2.41	1.40	25.8
细砂 C	1.3	2.38	1.39	24.1

1.3 试验步骤

1) 按试验设定的漏点位置安装模型隧道,并封堵隧道上面的圆形漏点,确保密封性良好。

2) 分层铺装砂样。为方便压实 fine 砂,按水:干砂 = 1:10 的比例配置含水率为 10% 的砂样,每隔 5 cm 装填一次砂样并压实至拟定层高。

3) 装样完成后,连接进水孔和水箱,向两侧水槽注入水至试验设定水位高度并静置 24 h,使砂土地层充分饱和。

4) 试验开始时打开水箱阀门,拔去螺栓,用量杯收集涌水涌砂过程中流失的水砂。

5) 每次试验结束后,清理模型箱内残余水砂,洗净装置并晒干砂样。

重复上述操作,进行下一组试验。

1.4 试验工况

为研究隧道涌水涌砂灾害引起砂土地层坍塌的演化过程及成灾机制,共设计了 13 组试验工况,探究 fine 砂密实度、隧道埋深、地下水位和漏点位置对该过程的影响,试验工况如表 2 所示。

表 2 试验工况				
Tab. 2 Test conditions				
试验组	粉细砂干密度/(g/cm ³)	隧道埋深/cm	地下水位	漏点位置
1	1.3	10	地面以下 10 cm	隧道下方
2	1.3	20	地面以下 20 cm	隧道下方
3	1.3	30	地面以下 30 cm	隧道下方
4	1.4	10	地面以下 10 cm	隧道下方
5	1.5	10	地面以下 10 cm	隧道下方
6	1.5	10	地面处	隧道下方
7	1.5	20	地面处	隧道上方
8	1.5	20	地面处	隧道下方
9	1.5	30	地面以下 30 cm	隧道下方
10	1.5	30	地面以下 20 cm	隧道下方
11	1.5	30	地面以下 10 cm	隧道下方
12	1.5	30	地面处	隧道下方
13	1.5	30	地面以下 10 cm	隧道上方

2 试验结果分析

2.1 隧道渗漏演化过程

隧道涌水涌砂灾害发生时,周围地层会发生水土流失。水土流失质量是反映隧道涌水涌砂灾害剧烈程度的重要指标。因篇幅有些,本文仅对第 6 组试验工况结果进行分析,探讨该组涌砂质量、涌水质量以及水土流失总质量随隧道涌水涌砂灾害发展过程的演化规律,结果如图 3 所示。

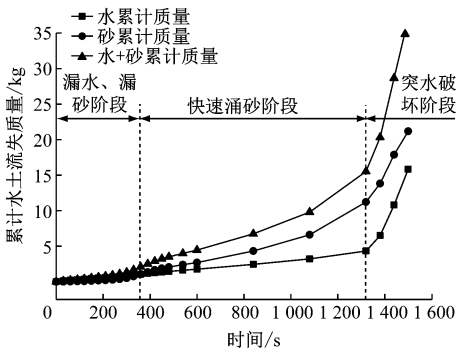


图 3 水土流失质量随时间的变化曲线
Fig. 3 Curve of water and soil loss mass over time

从图 3 可以发现如下规律:

1) 水土流失大致可分为 3 个阶段:漏水漏砂阶段、快速涌砂阶段、突水破坏阶段。

2) 当隧道涌水涌砂灾害处于漏水漏砂阶段时,涌砂涌水质量增长缓慢,随时间基本呈线性增加。随着水土流失的发展,隧道涌水涌砂灾害进入快速涌砂阶段。在该阶段,累计涌砂涌水质量以及水土流失总质量的曲线斜率不断增大,涌砂涌水速度不断增加。最后转入突水破坏阶段,随着水槽与漏点之间的 fine 砂地层被掏空,形成了贯通的突水通道,水土流失速度进一步提高,单位时间内涌水质量骤增。

3) 涌水涌砂质量以及水土流失总质量在各阶段的变化趋势基本相同,但快速涌砂阶段与突水破坏阶段水土流失总质量中涌水涌砂质量所占比例有所差异。快速涌砂阶段水土流失速度增大主要是由于涌砂质量的迅速增加引起的,该阶段涌砂质量占比大,约占水土流失总质量的 70%,而突水破坏阶段水土流失速度增大则是因为单位时间内涌水质量大幅增加,涌水质量占比显著提高。

由上述分析可知,盾构隧道涌水涌砂灾害处于不同发展阶段时,累计涌砂质量占累计水土流失总质量的比例存在显著差异。为此定义流失水土干物质比为试验过程中某时刻累计收集的涌砂质量占累计水土流失总质量的百分比,进一步分析流失水土干物质比随隧道涌水涌砂灾害发展的变化规律,结果如图 4 所示。

不难发现,在漏水漏砂阶段,隧道主要以涌水为主,由于漏点较大,在漏点附近未能形成稳定的土拱,隧道涌水涌砂灾害持续发展,流失水土干物质比迅速增加。到快速涌砂阶段时,流失水土干物质比基本保持稳定,变化范围在 60% ~ 80% 之间,

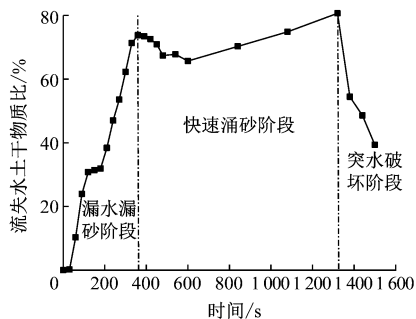


图4 不同阶段流失水土干物质比随时间的变化曲线

Fig. 4 Change curve of water and soil dry matter ratio over time at different stages

相应地这一阶段累计涌水涌砂质量比例基本保持恒定。进入突水破坏阶段后,流失水土干物质比显著下降,从80%降至40%左右,水槽与漏点之间形成了贯通的突水通道,隧道大量涌水,如图5所示。此阶段水土流失质量急剧增长且漏点难以封堵。



图5 突水破坏阶段水土流失情况

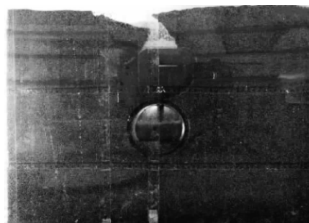
Fig. 5 Condition of soil and water loss at the stage of water inrush damage

综上,可以将流失水土干物质比作为判别隧道涌水涌砂灾害发展阶段的依据:当流失水土干物质比较小但增长较快时,此时涌水涌砂灾害尚处于漏水漏砂阶段,是对漏点位置进行封堵修复的最佳时机;当流失水土干物质较大且基本稳定时,可认为涌水涌砂灾害已进入快速涌砂阶段,水、砂大量流失,周围地层逐渐被掏空;当流失水土干物质比大幅降低时,涌水涌砂灾害处于突水破坏阶段,此时粉细砂已大量流失,隧道涌水量骤增,涌水涌砂灾害对隧道和地面建筑物造成不可逆转的危害。

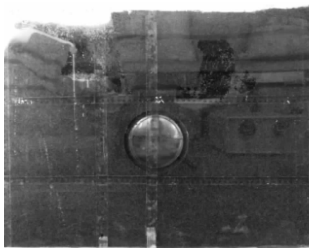
2.2 漏点位置对隧道涌水涌砂的影响

由表2可知,试验7和试验8可反映不同漏点位置对隧道涌水涌砂的影响。通过13组试验可以发现漏点位置对地层破坏形态影响非常显著。当

漏点位于上方时,仅会在漏点上方形成一个出砂椭圆,并不断扩大直至地面坍塌。当漏点位于下方时,则会在隧道两侧拱腰位置形成两个出砂椭圆并不断扩大直至地面坍塌,不同漏点位置土层横向破坏形态如图6所示。漏点位置不仅影响土体破坏形态,也会影响单位时间内的水土流失质量。不同漏点位置下水土流失质量随时间的变化如图7所示。



a) 漏点位于隧道上方



b) 漏点位于隧道下方

图6 不同漏点位置土层横向破坏形态

Fig. 6 Transverse failure mode of soil layer at different leakage spots

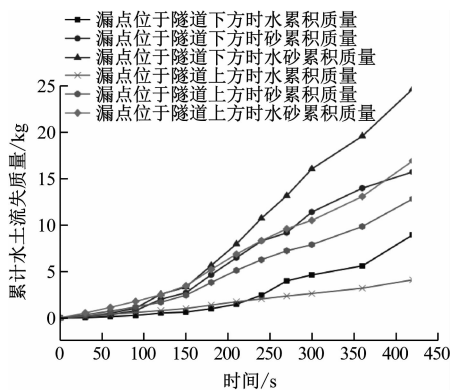


图7 不同漏点位置下方水土流失质量随时间变化曲线

Fig. 7 Change curve of water and soil loss mass over time below different leakage spots

由图7可知,隧道涌水涌砂灾害初期漏点位于隧道上方时的涌水涌砂质量以及水土流失总质量均大于漏点位于隧道下方时。但随着涌水涌砂通道的逐步形成,漏点位于下方时的涌水涌砂速度迅速增加,该试验工况下的水土流失质量超过漏点位于隧道上方时。出现这种情况可能是因为漏点位

于隧道下方时,涌水涌砂路径更长,形成贯通的涌水涌砂通道所需时间更久,所以前期涌水涌砂速度小于漏点位于隧道上方的涌水涌砂速度。但随着涌水涌砂通道的逐步形成,漏点位于隧道下方时,相同水位下水头差比漏点位于上方的水头差更大,其他条件相同时漏点位于隧道下方时水力梯度更大,砂土颗粒受到的电力更大,因此,水土流失速度更快,隧道涌水涌砂灾害发展更剧烈。

2.3 地下水位对隧道涌水涌砂的影响

针对地下水位于地面处、地面以下 10 cm、地面以下 20 cm 和地面以下 30 cm 四种情况开展隧道涌水涌砂试验,各工况下水土流失质量变化曲线如图 8 所示。

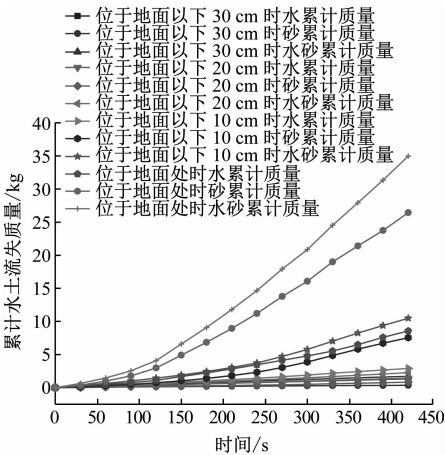


图 8 不同地下水位水土流失质量随时间变化曲线
Fig. 8 Change curve of soil and water loss mass over time on different groundwater levels

由图 8 可知,当地下水位于地面以下 30 cm 时,整个试验过程除试验开始时有极少量的漏水漏砂,其余时候涌水涌砂质量均不再增加,可看作隧道未发生涌水涌砂灾害。当地下水位分别位于地面以下 20 cm、地面以下 10 cm 和地面处时,地下水位距地面越近,相同时刻的累计水土流失质量越大,7 min 时地下水位位于地面处的累计水土流失质量是地下水位位于地面以下 20 cm 的累计水土流失质量的 15 倍多。显然,地下水位的升高,带来了水头差的增加,一旦隧道产生漏点,极大水头差会带动水土流失,尤其是细颗粒迁移,并逐步扩大渗流通道,引起严重的渗漏灾害。

2.4 粉细砂密实度对隧道涌水涌砂的影响

本节采用粉细砂干密度来反映粉细砂不同密实度,并通过第 1、第 4、第 5 组试验研究不同粉细砂

密实度条件下盾尾位置出现渗漏后水土流失质量规律,试验结果如图 9 所示。

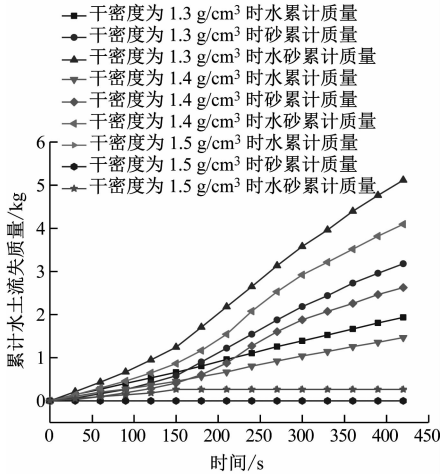


图 9 不同粉细砂密实度下水土流失质量随时间变化曲线
Fig. 9 Change curve of water and soil loss mass over time under different compactness of silty fine sand

由图 9 可知,当粉细砂干密度为 1.5 g/cm³ 时,在漏点附近形成了稳定的土拱,仅在试验初期会有少量的水砂漏出,之后涌砂质量不再增加,可认为该工况下不会发生涌水涌砂灾害。这是因为密实度较大的粉细砂颗粒之间排列紧密,细颗粒难以通过粗颗粒形成喉管,即使在大水头差作用下,也不易形成集中的渗漏通道,能阻止一定程度上的渗漏灾害。而当粉细砂干密度为 1.3 g/cm³ 和 1.4 g/cm³ 时,由于粉细砂颗粒排列相对松散,颗粒有效应力变小,粗颗粒形成的喉管变大,颗粒容易在高水头差的作用下发生迁移,并不断扩大渗漏通道,即隧道涌水涌砂灾害会持续发展,涌水涌砂质量随时间不断增加,且粉细砂干密度越小,单位时间内的水土流失总质量越大。可以看出,相较于紧砂地层,松砂地层中建造的隧道更容易发生涌水涌砂灾害。

2.5 隧道埋深对隧道涌水涌砂的影响

通过对比分析第 1 组、第 3 组试验结果,得到不同隧道埋深下水土流失质量变化曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知,隧道埋深越浅,单位时间内涌水涌砂质量以及水土流失质量越大,水土流失速度更快。换言之,当浅埋隧道发生涌水涌砂灾害时,灾害突发性强且危害性更大。这主要是由于隧道埋深较小时,隧道上方土层的自重应力小,在自重应力作用下隧道拱顶位置的土层相较于埋深大时松

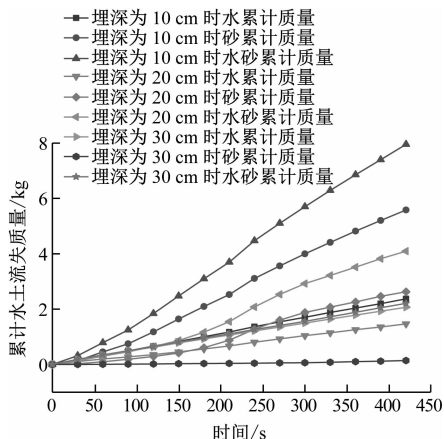


图10 不同隧道埋深下水土流失质量随时间的变化

Fig. 10 Change of soil and water loss mass over time at different tunnel buried depths

散,粉细砂颗粒之间排列不紧密,因此更易发生大规模的涌水涌砂灾害。

3 结论

1) 隧道涌水涌砂灾害演化过程大致分为三个阶段:漏水漏砂阶段、快速涌砂阶段和突水破坏阶段。各阶段水土流失总质量中涌砂质量所占比例存在差异,并提出采用流失水土干物质比参数作为判别隧道涌水涌砂灾害发展阶段的依据。

2) 漏点位置影响着流动区边界的形状。当漏点位于隧道上方时,会形成一个出砂椭圆空洞,并不断扩大直至地面坍塌;当漏点位于隧道下方时,流动区边界形状变化为双椭圆形并不断扩大直至地面坍塌。

3) 地下水位越高,形成的水头差越大,隧道涌水涌砂灾害约明显。土颗粒接触紧密程度对隧道涌水涌砂灾害影响显著,如较大密实度地层、较深埋深的工况均不易产生隧道的涌水涌砂灾害。

参考文献

[1] XIAO Y, CAO H, LUO G. Experimental investigation of the backward erosion mechanism near the pipe tip[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 767.
[2] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 北江大堤典型堤段管涌试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 818.
MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Experi-

mental study and analysis on piping of levee in Beijiang River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 818.

[3] VAN BEEK V M, VAN ESSEN H M, VANDENBOER K, et al. Developments in modelling of backward erosion piping [J]. Géotechnique, 2015, 65(9): 740.
[4] 张庆艳, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 断层破碎带突水突泥演化特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1911.
ZHANG Qingyan, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Experimental study on evolution characteristics of water and mud inrush in fault fractured zone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1911.
[5] 周宗青. 隧道充填型致灾构造突水突泥灾变演化机理及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
ZHOU Zongqing. Evolutionary mechanism of water inrush through filling structures in tunnels and engineering applications[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
[6] 周毅, 李术才, 李利平, 等. 隧道充填型岩溶管道渗透失稳突水机制三维流-固耦合模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1739.
ZHOU Yi, LI Shucai, LI Liping, et al. 3D fluid-solid coupled model test on water-inrush in tunnel due to seepage from filled Karst conduit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1739.
[7] 梁燕, 谭周地, 李广杰. 弱胶结砂层突水、涌砂模拟试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1996, 16(1): 19.
LIANG Yan, TAN Zhou-di, Li Guangjie. Simulation test research on water and soil outbursts of weak binding soil [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1996, 16(1): 19.
[8] 隋旺华, 蔡光桃, 董青红. 近松散层采煤覆岩采动裂缝水砂突涌临界水力坡度试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2084.
SUI Wanghua, CAI Guangtao, DONG Qinghong. Experimental research on critical percolation gradient of quicksand across overburden fissures due to coal mining near unconsolidated soil layers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2084.
[9] MUKUNOKI T, KUMANO N, OTANI J. Image analysis of soil failure on defective underground pipe due to cyclic water supply and drainage using X-ray CT[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2012, 6(2): 85.
[10] 张冬梅, 高程鹏, 尹振宇, 等. 隧道渗流侵蚀的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 429.
ZHANG Dongmei, GAO Chengpeng, YIN Zhenyu, et al. Particle flow simulation of seepage erosion around shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 429.

(收稿日期:2023-02-04)