

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.017

# 地下水管泄漏所致砂土渗流破坏试验研究

陶高梁, 李进, 庄心善, 崔惜琳, 胡其志

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 为探讨水管泄漏所致砂土破坏机理, 研制了水管泄漏所致砂土渗流破坏模型试验装置, 进行相关渗流破坏试验, 研究泄漏孔径和泄漏水压力对砂土渗流破坏的影响规律。结果表明: 在试验初始阶段, 土体随径向渗流力的增大发生“流土”现象; 当渗流水力梯度大于砂土破坏临界水力梯度时, 在泄漏处上方形成一个上抬的空洞, 泄漏孔径越小, 产生空洞的临界水压力越大; 在渗流力作用下, 空洞向上移动至表面, 空洞消散后土骨架彻底破坏, 在泄漏口上方形成贯通的混合流体, 这将直接导致土体承载力下降并产生沉陷。

**关键词:** 渗流破坏; 流土; 空洞; 水力梯度; 泄漏孔径

**中图分类号:** TU94

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2018)01-0097-06

## Seepage Failure Experiment of Sandy Soil Caused by Leakage of Underground Water Pipe

TAO Gaoliang, LI Jin, ZHUANG Xinshan, CUI Xilin, HU Qizhi

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

**Abstract:** In this paper, the test device of seepage failure model is invented to investigate the sand failure mechanism and study the influence of leakage diameter and leakage water pressure on the sand seepage failure. The results show that flowing soil phenomenon will occur with the increase of radial seepage force in the initial stage of the test. When the seepage hydraulic gradient is greater than the critical hydraulic gradient, a lifting cavity will occur above the leakage, the smaller the leakage diameter is the larger of critical water pressure to form cavity. Soil skeleton is completely destroyed while the cavity moves upward to the soil surface under the action of seepage force, afterward, transfixion mixed fluid will come into being above the leakage, which would directly lead to the decrease of soil bearing capacity and the bigger ground subsidence.

**Keywords:** seepage failure; flowing soil; cavity; hydraulic gradient; leakage diameter

在城市化发展过程中, 地下管网给人们带来极大的便利。然而, 城市地下管道由于历史的原因、土壤污染和管道防腐性能差等因素, 地下水管发生泄漏导致地下水位上升, 土体承载力极度下降, 在水土耦合作用下, 地面突然坍塌, 直接造成经济损失<sup>[1]</sup>。例如, 2016年11月8日, 日本福冈市城市道路中心突然发生塌陷, 出现两处长约15 m、宽10 m的大坑(见图1)。地下水管泄漏所致事故具有突发性和隐

蔽性, 为了认识灾害的发生机制与演化规律, 进而有效防治相关事故, 保证城市设施和人民生命财产的安全, 对地下水管泄漏所致土体破坏机理进行深入研究显得尤为重要。

国内外学者对于现阶段地下水管泄漏的研究还处于探索阶段, 在预防垂直渗流所致的危害方面, 邵东国等<sup>[2]</sup>利用田块变化水层条件下水流通过犁底层垂直入渗和侧向入渗试验, 并通过数值模拟进行了

收稿日期: 2017-09-25

修稿日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409097, 51209084, 51408201); 湖北省科技厅自然科学基金项目(2015CFB297, 2014CFB591); 湖北省教育厅科研计划项目(D20161405); 优秀中青年科技创新团队项目(T201605)

作者简介: 陶高梁(1979—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 主要从事土体孔隙结构及渗流等方面的研究。E-mail: tgl1979@126.com

通信作者: 崔惜琳(1986—), 女, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事多孔介质渗流方面研究。E-mail: cxl8607@gmail.com

对比,得出了土壤侧向渗漏对水量损失的贡献较大。罗居剑<sup>[3]</sup>论述了相应的设计优化的基本方法。地下水管泄漏不同于一般的垂直渗流,由于泄漏点渗流呈辐射状进入土体,相关机理有待深入研究。砂土在渗透水力作用下,发生流土现象并伴随细小颗粒逐渐脱离土骨架,引发土体内部结构的侵蚀,这是渗流作用下发生管流或管涌的现象<sup>[4]</sup>。土骨架中细颗粒的流失导致土的孔隙内部结构发生改变,从而影响了土体的物理性能,诸多学者对土体渗流破坏的特性做了定性判断<sup>[5-7]</sup>。均质无黏性土在渗流水流作用下发生渗透破坏,试验过程中伴发生水力筛分现象从而破坏土骨架的稳定性<sup>[8]</sup>。地下水管泄漏所致砂土渗流破坏时,砂土与水的流动本质上是一种复杂的混合流,在远离泄漏处,水流以多孔介质流形式存在;在泄漏处附近,水流则以孔流形式存在。该混合流的水力效应受到泄漏口径尺寸、土类的渗透性、泄漏处雷诺数等因素的影响,难以用统一公式描述<sup>[9-10]</sup>。Alsaydalani M<sup>[11]</sup>在进行地下水管泄漏模型试验时发现,当砂土上下孔隙水压差达到某一临界值时,从泄漏处垂直上方至土体表面形成一个楔形上抬区域,泄漏处上方生成空洞并伴有土颗粒在空洞中随水流的移动。Alsaydalani M 在模型试验中采用了竖直挡板,使得泄漏水体在土体中的渗流基本符合水平向均匀分布的假设。但一些专家学者在大量试验中发现地下水管泄漏水流其实服从径向辐射状渗流分布<sup>[12-13]</sup>。显然,Alsaydalani M 的试验模型难以准确的模拟实际砂土的破坏特征。



图 1 日本福冈市城市道路塌陷事故

对于局部泄漏所致流土的演化,学者们普遍认为经历了下述四个演化阶段<sup>[11,14-16]</sup>。

第一阶段:非流化阶段,在泄漏初期,土体保持原状,泄漏处上方的孔隙水压力不断积累直至达到渗流稳定状态,但始终低于流土发生的临界值。

第二阶段:稳定空洞阶段,当泄漏水量提高至一

定程度,土体上下的孔隙水压差增大至某一临界值。在泄漏处,上方土体在泄漏水流冲击作用下形成一个楔形上抬区域并形成空洞(见图 2),随后空洞不断的增长直至达到稳定状态,空洞内部可观测到漩涡以及土颗粒随流体的旋转移动。

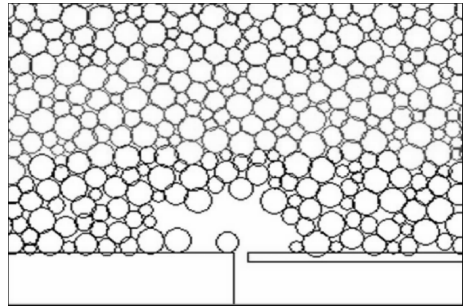


图 2 空洞示意图

第三阶段:增长空洞阶段,当泄漏水量进一步提高时,空洞稳定平衡被打破并且持续增长,大量土颗粒从土体中剥离随水流向上慢慢移动。

第四阶段:完全流化阶段,当空洞持续向上增长到土体表面时,在泄漏处与土体表面形成连续贯穿的水道,大量土颗粒随水流被带至土体表面,在泄漏处上方和土体表面形成一个稳定的水土耦合作用混合流。

虽然对于以上局部泄漏所致流土的四个阶段人们已有大致的认知,但是对于各阶段在何种情况下会过渡至下一阶段仍存有疑问,这极大地阻碍了对于空洞演化内在机制的认知。其中,稳定空洞阶段是连接流土发生与土体最终破坏的纽带,而且它的产生和发展机理尚未明晰。而且其内在演化过程、变形特性以及破坏发展过程仍需要完善。

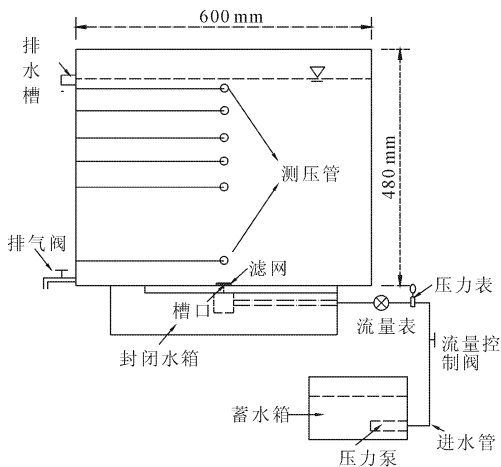
本文研制了地下水管泄漏所致砂土破坏的模型试验装置,对不同泄漏孔径及不同泄漏压力情况下的砂土破坏规律进行试验研究和探讨,为建立相关的预测理论提供必要的依据。

## 1 模型研制及试验过程

### 1.1 模型装置研制

试验模型装置(见图 3)中方形箱体采用有机玻璃材料制作,其透明材质有利于直接观测试验箱内砂土破坏的过程,试验箱长宽高为 600 mm × 480 mm × 150 mm。压力泵将蓄水箱内的水送至试验箱下部的封闭水箱内,封闭水箱上切取一个槽口,槽口与一敞口塑料螺帽连接,二者之间放置有机玻璃片,玻璃片中间钻取不同大小的孔径以模拟不同泄漏孔

径。试验箱体分别在泄漏槽口垂直上方分布 6 根测压管,用于测量土体内孔隙水压力大小,测压管位置高度分别为 5 cm、20 cm、25 cm、30 cm、35 cm、40 cm。测压管读数均以泄漏处水平高度为零势面,由于试验水体流速较低,从下至上渗流过程中流速变化不大,所以可忽略流速水头的作用<sup>[17]</sup>,即试验测压管读取的为总水头。试验箱体上方还设有排水槽,在连接封闭水箱和蓄水箱的管道中间安装了压力传感仪和流量表。



(a) 设计示意图



(b) 实际模型装置

图 3 模型试验装置

模型研制经过 3 个月的反复调试及优化最终完成。对于压力泵的选择,尽管试验小型变频泵可以调节水压力,但是压力远远不足以使土体发生破坏。随后利用工业用泵调试,其优点在于扬程大,一般水压力能达到 0.16 MPa,但是恒定水压无法达到试验预期效果。最后采用变频增压泵做为试验水泵,其功能在于其结合了前面两者的优点,其本身有一定的吸力能提供足够大的水压力,而且能够更换频率调节水压力的的大小。模型主体采用有机玻璃材料,方便观察试验过程中发生的现象,但一般厚度有机玻璃强度难以满足试验要求,最终采用加厚有机玻璃制

作。

### 1.2 试验过程

试验砂土颗粒级配曲线如图 4 所示,物理参数见表 1,  $C_u$  为砂土的不均匀系数,  $C_c$  为曲率系数。将烘干的砂土按一定质量与水充分均匀搅拌,分层放入试验箱体中,最终土样尺寸大小为:  $l \times h \times b = 60 \text{ cm} \times 43 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ ,砂土最终用量  $m$  为 52.3 kg。土样装填完成后进行加水饱和,保持水位高于试验箱体砂土覆盖的水位,然后利用下部排气阀将气体排出,防止空气对试验效果造成影响。试验开始调节压力泵参数,压力值从小逐步增大。试验过程中,观测并记录 6 根测压管水头。特别需要说明,水头大小变化很快,难以记录水头与时间之间的关系,因此试验中待测压管水头稳定后记录读数以及流量大小。在三个玻璃片上钻取 1.0 mm、1.5 mm 和 3.0 mm 不同的孔径,分别开展泄漏试验。此外,试验过程中专人负责观察有机玻璃箱内砂土的破坏现象,特别观察空洞形成过程。

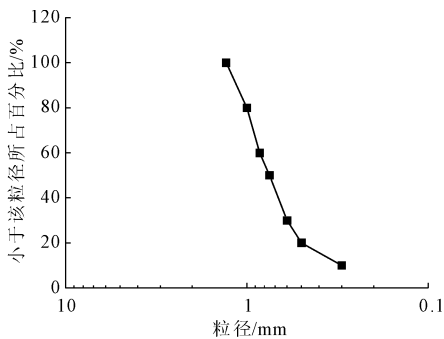


图 4 砂土颗粒级配曲线

表 1 土体各项参数值

$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$	相对密度
0.3	0.6	0.85	2.83	1.41	2.65

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果及空洞现象

试验调节压力值按 0.01 MPa、0.02 MPa、0.03 MPa、0.04 MPa、0.05 MPa 依次增大,相应流量见表 2。根据试验结果,绘制不同泄漏水压力下总水头随高度的变化关系,如图 5 所示。从直观效果上看,不同高度对应总水头大致呈线性关系。距离泄漏口越近、总水头变化幅度越大(比如,5 cm 处变化幅度最大);距离泄漏口越远、总水头变化幅度越小。此外,不同高度处总水头随泄漏水压力均呈现先增大后减少的趋势,在泄漏水压为 0.04 MPa ~ 0.05 MPa 时最

终基本保持恒定值。

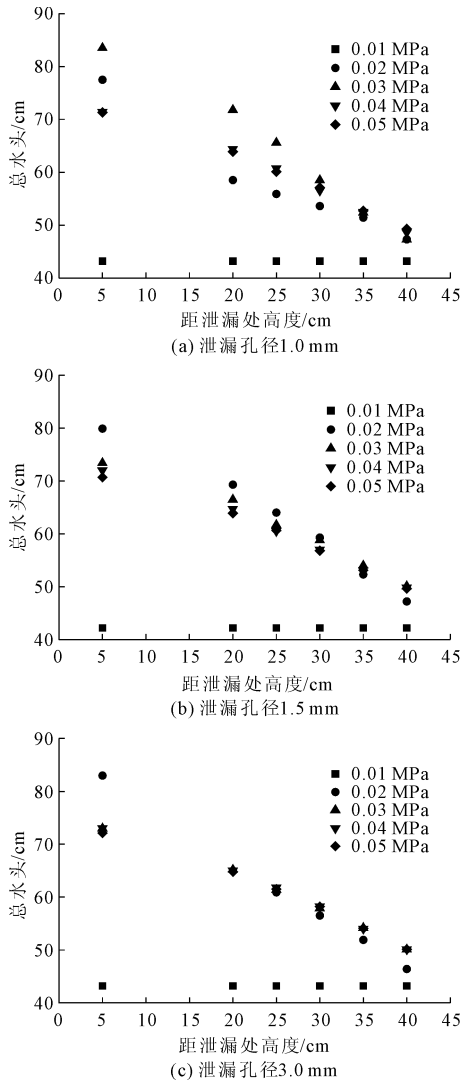


图 5 总水头随高度的变化

表 2 不同泄漏水压及不同泄漏孔径条件下的流量大小

泄漏孔径 /mm	不同泄漏水压(MPa)下流量/(L·h <sup>-1</sup> )				
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
1.0	—	0.106	0.190	0.292	0.377
1.5	—	0.106	0.202	0.291	0.373
3.0	—	0.106	0.219	0.284	0.368

根据试验结果,绘制不同高度处总水头随泄漏水压变化规律如图 6 所示,随着泄漏水压力的不断增大,不同高度处测压管总水头变化趋势为先增大后减小,并最终稳定。在泄漏口附近(距泄漏口 5 cm 处)总水头随泄漏水压变化呈现明显的峰值,该峰值形成与砂土空洞的形成密切相关(后文将进一步讨论)。将峰值对应的泄漏水压定义为临界泄漏水压,泄漏孔径为 1.0 mm 时,临界泄漏水压

为 0.03 MPa;泄漏孔径为 1.5 mm、3.0 mm 时,临界泄漏水压为 0.02 MPa,说明泄漏孔径越小,临界泄漏水压越大。

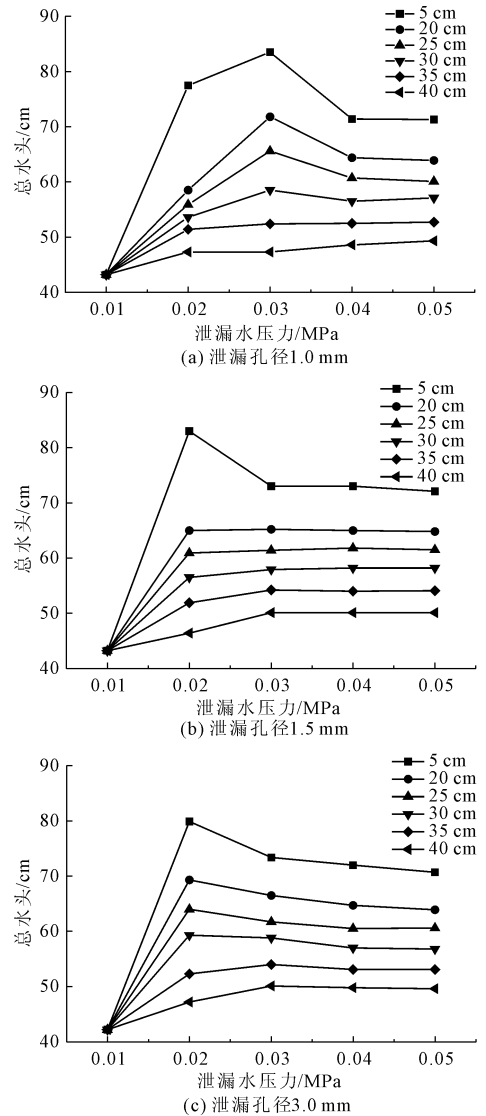


图 6 不同高度总水头随泄漏水压力的变化

泄漏水压超过峰值对应的压力时,有机玻璃箱可以观测到在泄漏处上方形成一个聚积满水的空洞,见图 7。空洞形成后,泄漏处上方土体表面出现小范围隆起。随持续渗流力作用,空洞向上移动直至表面,最终消散。由于试验过程中泄漏水压较大,空洞发生至消散时间大约为 5 s 时间左右,试验过程中测压管水头变化很大,难以通过时间记录空洞从发生到消散过程中总水头变化,因此,试验数据采集的是渗流稳定状态下测压管水头的读数。从临界泄漏水压,继续增大水压 0.05 MPa 后,不同高度处测压管的水头大小均保持稳定,砂土已经达

到最终渗流破坏且处于混合流状态。



图 7 试验过程中出现的空洞

### 2.2 空洞的形成及砂土破坏机理分析

为进一步具体查明地下水管泄漏所致砂土破坏的内在机理,结合砂土渗流破坏过程水力梯度变化进行分析。水力梯度是水流通过单位长度渗透途径为克服摩擦阻力所损失的机械能,能较好反映土体渗流过程中力学性能变化。根据达西渗透理论,渗透途径水头损失与渗透途径长度的比值为水力梯度,计算并拟合得到不同泄漏孔径条件下不同高度处的平均水力梯度,平均水力梯度随泄漏水压力的变化如图 8 所示。表 3 为线性拟合结果,其中  $i$  为平均水力梯度, $R$  为拟合相关系数。 $R$  都接近于 1,表明水力梯度随高度的变化整体上较均匀。

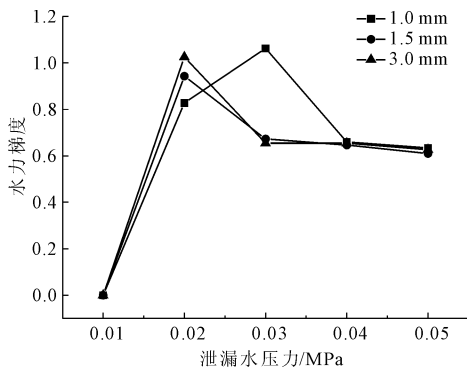


图 8 不同泄漏孔径下水力梯度的变化

表 3 水头梯度大小及拟合相关系数

泄漏水压力 /MPa	不同泄漏孔径 (mm)时 $i$			不同泄漏孔径 (mm)下 $R$		
	1.0	1.5	3.0	1.0	1.5	3.0
	0.01	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
0.02	0.828	0.943	1.026	0.928	0.978	0.993
0.03	1.062	0.673	0.655	0.981	0.973	0.988
0.04	0.660	0.646	0.654	0.975	0.986	0.985
0.05	0.634	0.610	0.627	0.985	0.980	0.981

观察图 8,可以发现不同泄漏孔径下,平均水力梯度随泄漏水压力的变化均存在一明显的峰值。峰

值对应的横坐标为 2.1 节定义的临界泄漏水压力,纵坐标为临界水力梯度,具体值如表 4 所示。

表 4 不同泄漏孔径对应临界水力梯度

泄漏孔径 /mm	临界水力梯度 $i_{cr}$	泄漏临界水压力/MPa
1.0	1.062	0.03
1.5	0.943	0.02
3.0	1.026	0.02

依据临界水压力(临界水力梯度),分析图 8 可知:

当泄漏水压小于临界水压力时,处于水力梯度增长阶段,这个阶段水力梯度大小随泄漏水压力的增大而增大,这即是前言叙述第一阶段(非流化阶段)。

泄漏水压力达到临界水压力后,水力梯度和总水头达到峰值,在渗流力作用下,土体局部抬起形成一个空洞,随后空洞随水流向上移动消散在表面发生最终渗流破坏,此阶段处于空洞形成和破坏阶段。由于空洞形成及消散的时间较短,此阶段实际上包括了前言中第二和第三阶段(稳定空洞阶段和增长空洞阶段),本次试验由于条件限制未能区分。空洞自形成到消散是一个土骨架彻底破坏并伴随粗细颗粒重新排列的过程,类似于水力筛分作用。对于无黏性土,土骨架中粗颗粒起主体结构,细颗粒填充于粗颗粒之间的孔隙中,细颗粒含量的大小对土体渗流变形起关键作用,空洞上升过程将粗颗粒冲散在渗流范围外侧,细颗粒随水流作用迁移到表面,土体表面能观测到细颗粒在水流作用下发生明显的跳跃、沸腾的现象,这种现象通常称之为“砂沸”。本文研究发现,临界水压力(临界水力梯度)可作为空洞形成的临界标志。实际上,临界水力梯度的理论计算公式如式(1)所示:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} - 1 \quad (1)$$

式中: $\gamma'$  是土的浮重度,一般为  $8 \text{ kN/m}^3 \sim 12 \text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma_w$  是水的重度,一般取  $10 \text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma_{sat}$  是水的饱和重度。 $i_{cr}$  是破坏临界水力梯度,一般近似取  $i_{cr}$  为 1。表 4 中实测临界水力梯度均与 1 较为接近,相互验证了实测值与理论值的合理性。

当泄漏水压力大于临界值时,砂土实际上已完全破坏,水力梯度降低并维持在一恒定值,这一阶段为完全流化阶段。此时,泄漏处至土体表面形成贯通的混合流体,如图 9 所示。图 8 清楚的表明,从临

界破坏压力至管内最大试验压力(0.05 MPa),不同高度总水头和水力梯度仍保持不变,这间接证明了空洞消散后土体处于混合流状态,本次试验发现该混合流的水力梯度维持在 0.6,且泄漏孔径对该值基本没影响,其机理值得进一步研究。

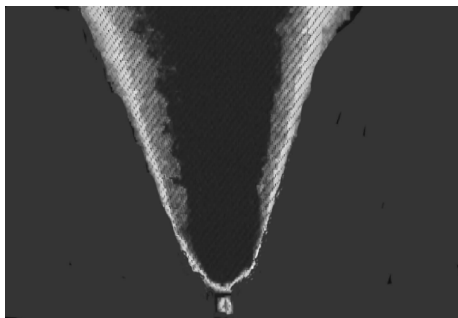


图 9 混合流模拟图

### 3 结 论

本文试验创新点,在于自主研发了一套模型装置,通过试验研究了泄漏孔径及水压力对砂土渗流破坏的影响规律。本文试验验证了砂土破坏时的“空洞现象”,该现象可作为地下水管泄漏所致砂土破坏的重要标志,“空洞”的形成及破坏过程经历时间较短,实际包含了稳定空洞阶段和增长空洞阶段。本文试验表明,临界泄漏水压力可作为空洞形成的判定依据,泄漏孔径越小,临界泄漏水压力越大。空洞随径向渗流力移动至土体表面,其消散标志着土体的最终破坏。空洞消散后,泄漏孔至土体表面形成一道贯通的混合流体,不同高度总水头和水力梯度( $i = 0.6$ )都保持稳定,且泄漏孔径对该值基本无影响。

#### 参考文献:

[1] 周 建,张映钱,方亿刚,等.水位变动及降雨入渗联合作用对岩溶地面塌陷的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):218-222.

[2] 邵东国,杨 震,徐保利,等.南方丘陵区多层土壤结构水平和垂向渗流特征试验与模拟研究[J].水利学报,2017,48(7):799-807.

[3] 罗居剑.垂直防渗技术在土石坝除险加固工程中的应用和设计优化[J].水利与建筑工程学报,2012,10(2):111-116.

[4] Ladd R. Preparing test specimen using under compaction[J]. Geotechnical Testing Journal, 1978,1(1):16-23.

[5] 周 健,姚志雄,张 刚.砂土渗流过程的细观数值模拟[J].岩土工程学报,2007,29(7):977-981.

[6] 李喜安,陈文军,邓亚虹,等.渗流潜蚀作用临界发生条件的推导[J].水土保持研究,2010,17(5):217-221.

[7] 罗玉龙,吴 强,詹美礼,等.渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验装置的研制及初步应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):2108-2114.

[8] 黄德文,陈建生,陈 亮,等.均质无黏性土流土发生机制室内模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3424-3431.

[9] Niven R K, Khalili N. In situ fluidization by a single internal vertical jet[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998,36(2):199-228.

[10] Van Zyl J E, Clayton C R I. The effect of pressure on leakage in water distribution systems[J]. Water Management, 2007,160(2):109-114.

[11] Alsaydalani M. Internal fluidization of granular material[J]. Journal of Clinical Investigation, 2010,54(2):316-325.

[12] Cui X L. Numerical simulation of internal fluidisation and cavity evolution due to a leaking pipe using the coupled DEM-LBM technique[D]. Birmingham: the University of Birmingham, 2012.

[13] Cui X L, Li J, Chan A, et al. Coupled DEM-LBM simulation of internal fluidisation induced by a leaking pipe[J]. Powder Technology, 2014,254(2):299-306.

[14] Rogers C D F, Chapman D N, Royal A C D. Experimental investigation of the effects of soil properties on leakage: final report[R]. Birmingham: University of Birmingham, 2008.

[15] Zoueshtiagh F, Merlen A. Effect of a vertically flowing water jet underneath a granular bed[J]. Physical Review E, 2007,75(5):056313.

[16] Philippe P, Badiane M. Localized fluidization in a granular medium[J]. Physical Review E, 2013,87(4):042206.

[17] 胡敏良,吴雪茹.流体力学[M].武汉:武汉理工大学出版社,2011.