

DOI: 10.11779/CJGE201811020

间断级配砂土中管线破损引起的渗流侵蚀模型试验

张冬梅^{1,2}, 杜伟伟², 高程鹏¹

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 频发的路面塌陷事故对城市安全造成了巨大威胁, 主要原因是地下管线破损引起周围土体的渗流侵蚀, 进而产生了地下空洞所致。针对目前常见的地下无压管线破损问题, 提出了一种研究间断级配砂土中破损管线周围渗流侵蚀特性的模型试验方法。基于试验中的水土流失变化和受侵蚀区域的发展规律, 揭示了间断级配砂土中侵蚀过程可分为快速侵蚀阶段、稳定侵蚀阶段和收敛阶段, 土体中由于侵蚀变形产生的松动区和空洞扩展规律与砂土流失变化一致。对比不同工况的侵蚀量和最终侵蚀状态, 得到了土体饱和度和水位高度通过影响渗流力而改变侵蚀量和空洞形态, 土体级配则决定了可流失细砂含量, 从而影响侵蚀量和空洞大小, 而当管线破损形状只导致细粒流失时, 破损尺寸的增大将增多流失路径数量, 进而增大了侵蚀量, 但此因素影响较小。

关键词: 管线渗漏; 渗流侵蚀; 模型试验; 影响因素; 间断级配砂土

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)11-2129-07

作者简介: 张冬梅(1975-), 女, 博士, 教授, 主要从事隧道结构安全及施工环境影响方面的研究。E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn。

Model tests on seepage erosion caused by pipeline damage in gap-grading sand

ZHANG Dong-mei^{1,2}, DU Wei-wei², GAO Cheng-peng¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Road collapses occur frequently, which is a large threat to the city safety. The collapse is initiated by the ground cavity caused by the internal erosion around buried broken pipelines. In view of this problem, a model test method is presented to study the characteristics of the internal erosion due to broken pipelines in gap-grading sand. The process of erosion could be divided into three stages of rapid erosion, steady erosion and convergence stage in terms of the mass of eroded soil. Loose area and cavity are produced due to deformation of eroded soil and expand similarly to the process of erosion. The soil erosion and final erosion states under different conditions are compared, which reveals that the soil saturation and water level can influence the erosion amount and cavity state by affecting the seepage force. Besides, the initial soil grading determines the content of fine sand which can migrate away, affecting the erosion degree and cavity area. Finally, the larger pipe defect causes more migration pathways and increases the soil loss when the defect shape allows the fine particles to migrate into the pipe merely, but it has little influence.

Key words: pipeline leakage; internal erosion; model test; influential factor; gap-grading sand

0 引言

近年来, 城市路面塌陷事故剧增, 这主要因为路面以下地层中产生了大量隐伏空洞, 在车辆循环荷载作用下, 空洞上方土体将会产生塑性滑移面而突然坍塌^[1]。针对这一问题, 目前很多研究集中在用现有地球物理技术对地下空洞的探测上, 如地质雷达等^[2-3]。而在塌陷机理上, 一些学者采用数值及解析方法研究已有空洞的路面塌陷^[4-5]。对于空洞的形成机理, 目前仍以岩质地层的地下水剥蚀及溶蚀空洞研究为主^[6-7]。

而在土质地层的渗流侵蚀方面, 最早开始于对坝

体反滤层的研究, 以防止发生渗透破坏, 又基于理论及试验, 给出了渗透稳定性的经验公式, 揭示了颗粒尺寸与级配是影响渗透破坏的最主要因素^[8-10]。同时土体围压、流失孔径等因素也会影响渗透稳定^[11-13]。这些因素也是影响地下水渗流侵蚀产生空洞的内因。

胡聿涵等^[14]通过国内道路塌陷案例的统计分析, 发现管线破损渗漏是引起空洞的直接因素。破损管线

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772295, 51478344); 上海市科委资助项目(16DZ1200403)

收稿日期: 2017-09-17

为地下水渗流提供了新的路径, 引发的侵蚀性水土流失会导致空洞的产生并不断扩大, 最终在交通荷载下发生塌陷。对于管线破损导致的空洞塌陷问题主要以日本的研究居多。桑野玲子等^[15]通过给水管破损时的循环侵蚀砂槽试验和单向渗流侵蚀砂槽试验, 得到空洞是在破损口上产生并向上逐渐扩展的, 砂土类型则对空洞大小及稳定性影响较大。Sato 等^[16]通过模型试验探究了地下结构对侵蚀发展的影响, 得到侵蚀及空洞是沿地表到管道破损口的最短路径发展, 结构物与土体接触界面处的水力传导性较大, 会加剧局部渗流侵蚀。Kuwanon 等^[17]通过一个高尔夫球场塌陷的工程实例, 发现是地下排水管形成了早期水土流失的通道, 从而得到管道损坏是实际塌陷事故的直接触发因素。

先前学者多是对坝体内水平向渗流破坏的研究, 与管线破损引起的水土流失型侵蚀有所区别。而近年来国内对土质路面塌陷的研究还处于起步阶段, 现多以工程案例分析或空洞探测的手段研究, 缺乏对侵蚀及空洞形成机理的探究。日本学者的研究相对深入, 但主要针对均匀级配砂土, 而工程中常见的却是粗细颗粒混合的土层条件, 这种有粗粒骨架的管涌型侵蚀及空洞形成机理, 与均匀砂土中无骨架支撑的水土入渗流失有较大差别。因此, 本文设计了一种模型试验方法, 研究间断级配砂土中, 无压管线破损引起的地下水渗流侵蚀发展特性及空洞的形成特征, 并通过对不同条件下的侵蚀特征, 揭示了土体饱和度、水位、砂土级配和管线破损尺寸这 4 种因素对侵蚀的影响。

1 试验装置与方案

1.1 试验装置

为模拟管线渗流侵蚀, 本文设计了如图 1 所示的模型试验装置, 左侧图为装置的正视图, 右侧图为装置的侧视图。装置均为有机玻璃制作, 刚度大且可加工性好, 材质透明可观测内部侵蚀过程。装置中间的土槽长 400 mm, 宽 200 mm, 高 750 mm, 用于试验中盛放配置好的土样, 本次试验土样高度均为 500 mm。两侧水槽各 100 mm 长, 水槽外壁有一进水口和若干不同高度的溢流孔, 通过底部进水口补充水, 再从某一高度溢流孔出水的方式控制恒定的水位条件。水槽与土槽之间为透水板, 只允许水通过, 透水性良好, 以保证水槽中水位和土体中水位基本一致。

桑野玲子等^[18]通过对实际埋管的调查统计, 发现包括陶瓷管、塑料管及金属管在内多数管道的破损形式主要为局部的腐蚀老化缺失和受力裂缝, 且多位于管顶, 只对上方土体产生渗漏侵蚀影响。因此本试验将管道从土槽中间底部插入, 忽略管下土体影响。考

虑模型尺寸, 管道直径设为 100 mm, 远大于破损口尺寸, 对侵蚀结果和机理无影响。管道外伸 50 mm, 用于收集流失水土。本试验对实际破损形式进行了简化模拟, 并参考 Sato 等^[16]和 Mukunoki 等^[19]试验的破损口设置, 共设如图 2 所示的 3 种形式破损。其中流失孔为 5 mm 直径圆, 而流失缝为 10 mm×5 mm 的长圆形孔, 避免矩形孔的应力集中, 同时具有圆形孔的特征, 减少形状对渗漏的影响。流失缝分为纵缝与环缝, 尺寸均比流失孔大。破损口均位于插入端管顶, 以便从装置前观测内部侵蚀过程。管道可拆卸, 每次试验根据条件只使用某一破损口的管道。安装后, 可用橡胶条堵住破损口, 然后装填土样抬升水位。开始试验时, 将手伸入管道拔掉橡胶条, 即开始渗流。

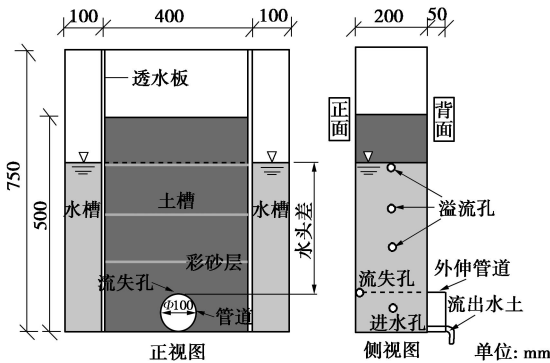


图 1 试验模型装置示意图
Fig. 1 Model test equipment

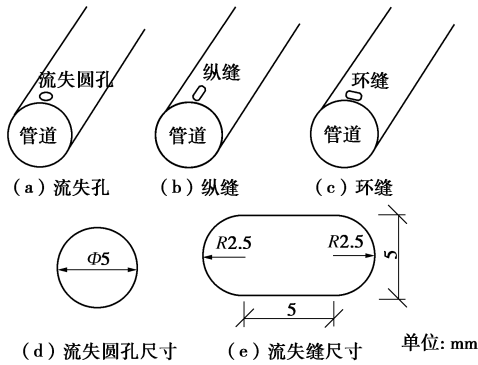


图 2 管线破损形式及尺寸示意图
Fig. 2 Types and sizes of pipe defect

1.2 试验工况

本次研究共设计 8 组试验, 不同工况按照控制变量的设计原则只改变某一影响参数, 以探究土体饱和度和水位高度、土体级配和管线破损尺寸 4 种因素的影响。具体试验工况及条件见表 1, 其中 C1 和 C3 工况探究土体饱和度的影响; C2, C3, C4 工况探究水位高度的影响; C1, C5, C6 工况探究颗粒级配的影响; C2, C7, C8 工况探究管线破损尺寸的影响。

本试验材料为石英砂, 其性质稳定无杂质, 可重

复性好。试验选取间断级配砂土，从而简化管涌型土层模型。细砂粒径为 0.075~0.25 mm，以模拟一般的粉细砂土层。而根据 Binner^[12]的研究，砂土的支撑骨架粒径为 4 mm 左右，因此选取粒径为 2~5 mm 的细砾作为土体粗粒骨架。土样的级配曲线见图 3。同时破损口宽设为 5 mm，可保证只有细砂流失。

表 1 试验工况汇总表

Table 1 Test cases					
研究因素	砂土级配 (细砂:细砾)	饱和度	破损口	管上 水位/cm	编号
饱和度	6:4 (记 S6:4)	不饱和	流失孔	30	C1
				20	C2
		饱和	流失孔	30	C3
				40	C4
水位高度	6:4 (记 S6:4)	饱和	流失孔	30	C5
				40	C6
土体级配	4:6 (记 S4:6)	不饱和	流失孔	30	C7
	8:2 (记 S8:2)			30	C8
破损尺寸	6:4 (记 S6:4)	饱和	流失纵缝	20	C7
			流失环缝		C8

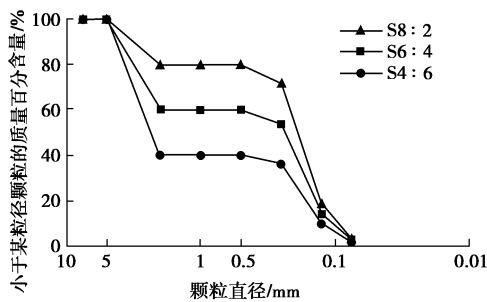


图 3 试验砂土颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curves of soil samples

各级配石英砂的物理性质经室内试验测得，其相关参数见表 2。石英砂土的内摩擦角很大，粗颗粒能形成相对稳定的骨架。土样采用 80%相对密实度。

表 2 模型试验各级配石英砂基本参数

Table 2 Parameters of different grading sand						
级配	最小干密度 /(g·cm ⁻³)	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	相对密实度/%	相对密度	孔隙率/%	内摩擦角/(°)
S4:6	1.703	2.034			25.8	37
S6:4	1.647	1.982	80	2.64	27.8	39
S8:2	1.479	1.775			35.3	36

1.3 试验步骤

管线渗流侵蚀试验是保持恒定水位时，土颗粒在渗流作用下随水向下流入破损口，并从装置前侧观察侵蚀变形过程。具体试验步骤主要分为以下 4 步。

- (1) 试验前检查仪器，安装管道，堵住流失孔。
- (2) 按 80%相对密实度计算各土层所需装填量，称量配置土样，搅拌后通过落雨法撒落土槽，然后分

层压实至拟定层高，每隔 10 cm 铺一薄层红砂，共铺设 4 层土层。装填不饱和土样时，先填土样再抬高水位浸润土体，测得饱和度约为 75%。装填饱和土样时，先升高水位再在水中撒落砂土，最后进行真空饱和。

(3) 打开流失孔，开始试验。试验中对侵蚀过程进行拍摄，同时从管道中收集并测量流失水土质量。

(4) 试验结束后，逐步挖出土槽中土体，收集破损口上不同高度处土样，分析侵蚀后土层级配变化。

2 破损管线的渗流侵蚀发展过程分析

不同工况侵蚀发展过程有相似特征，本文首先以 C3 工况为例研究管线破损引起渗流侵蚀的共同规律。

2.1 侵蚀形态的发展

侵蚀形态的发展如图 4 所示。通过红砂移动可以看出细粒的迁移流失状态，首先最靠近破损口的细砂向管内流失，接着上方细砂向下补充迁移，受侵蚀土体范围扩展，表现为更大范围红砂发生位移。而一旦土骨架间细砂迁移流失，受侵蚀土体开始松弛，骨架由于失去细粒的侧向支撑作用，在渗流扰动下将发生变形，以达到新的平衡。于是表现为水位以下整个受

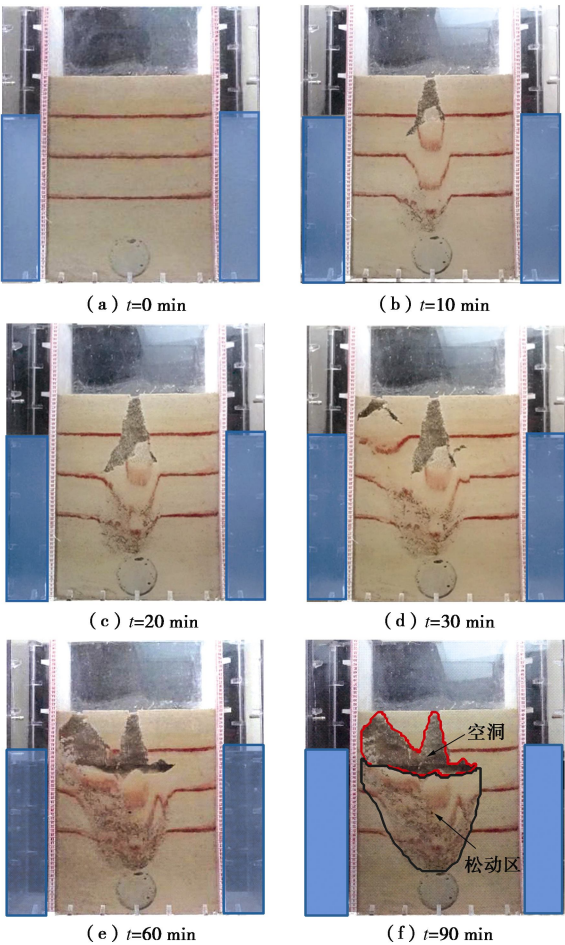


图 4 侵蚀的发展过程

Fig. 4 Development of erosion

渗流侵蚀土体的沉降,地下空洞便在水位高度处产生。随着细砂的不断流失,侵蚀沉降持续发生,空洞向下扩展。事实上空洞是否形成及形成位置还受到饱和度和水位等因素影响,后文将进行分析。最终随着骨架间细粒含量的减少,侵蚀速度降低并逐渐停止侵蚀。

土体侵蚀区域可被分为空洞区和松动区。根据拍摄的高清照片,空洞区轮廓明显,松动区范围则根据以下原则确定:土体受侵蚀时松动区内红砂发生明显运移;松动区孔隙增大,粗粒显现;侵蚀较大时松动区沉降会与周围土体之间产生滑裂面。结合 CAD 面积计算可对划定的不规则空洞区和松动区进行量化。可以看出侵蚀时,松动区土体由于粗粒孔隙间细砂流失而发生变形,其范围随时间不断向上及两侧扩展。空洞区无土体,随时间向下扩展,最终均趋于收敛。

渗流侵蚀在前 30 min 最为明显,侵蚀发展至大部分土体,空洞产生。之后细砂流失速度下降,侵蚀收敛。60 min 后侵蚀几乎不再发展,整个土体保持稳定。

2.2 水土流失量的发展

而侵蚀的实质是细粒在渗流作用下不断流失的过程,其砂土流失量与空洞及松动区存在以下关系:

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} = V_c + \sum_{i=1}^m (V_{li} \cdot \Delta n_i) \quad (1)$$

式中 V_s 为流失细砂体积; M_s 为流失细砂质量; ρ_s 为细砂密度; V_c 为空洞体积; m 为松动区划分层数; V_{li} 为第 i 层松动区体积; Δn_i 为第 i 层松动区孔隙率增量。

其中空洞体积要比松动区孔隙增量大,因此砂土流失量与空洞的大小密切相关,因此研究侵蚀过程中的砂土流失对判断侵蚀程度和空洞大小有重要意义。

如图 5 是试验时水土流失量的发展。开始时砂土快速流失,该阶段产生松动区并向上发展,当流失路径发展至水位高度处,上部土体不发生细砂流失,侵蚀土体变形沉降,产生空洞。15 min 出现斜率转折点,随后砂土以稳定的速度流失,空洞向下扩展。60 min 再次出现斜率转折点,砂土流失趋于收敛和稳定,表明侵蚀基本不再发展,空洞和松动区也逐渐稳定。

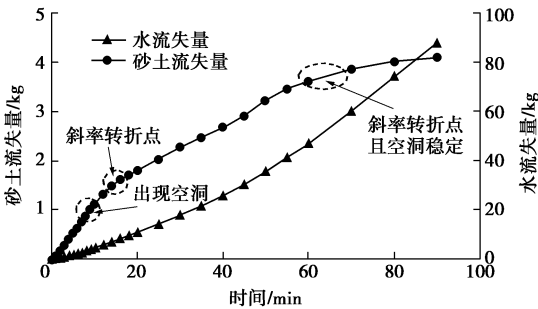


图 5 水土流失量的发展

Fig. 5 Development of soil and water loss

而侵蚀过程中水流失量均呈斜率增大的特征增长,说明土体渗透性缓慢增加。这是因为土体中细砂流失导致土体松弛,土骨架间孔隙增大,水的流失通道面积随之增加,从而土体渗透率缓慢增大,同时空洞的出现导致渗流路径变短,所以流速增加。

2.3 侵蚀后土层级配的变化

侵蚀后对流失孔上方不同高度土层进行筛分试验,得到如图 6 所示的级配曲线。初始级配是装填土样的级配,即 S6:4。曲线越靠下,意味着侵蚀后该处细砂含量越低。可以看出,越靠近破损口的土层,细砂流失越多。因为此处细砂流失路径较短且水头较大,细砂易发生运移。而上层土体流失路径较长,这导致颗粒运移距离增加,中途堵塞的可能增大,且渗流力较小,所以细砂流失量降低,土层级配逐渐接近初始级配。而水位以上的土层(破损口上 35 cm)不发生渗流侵蚀,颗粒级配也就没有变化。这也说明不同深度土层的侵蚀程度和变形沉降是不同的,靠近破损口的土层变形大,且最先发生细砂流失,因此侵蚀前期发展较快。而上部土层由于水头较小,产生的侵蚀量和变形较小,侵蚀也较晚发生,因此后期逐渐稳定。

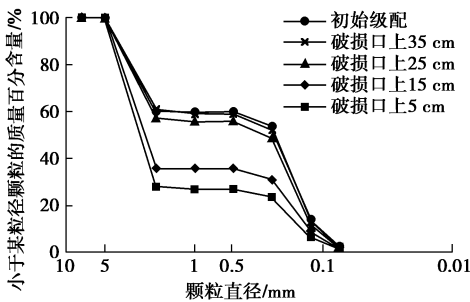


图 6 侵蚀后各土层级配

Fig. 6 Grading curves of eroded soil layers

因此,破损管线引起的渗流侵蚀发展,其实质是土体中细粒在渗流力作用下,不断从粗粒骨架间运移并流失的过程,开始时细砂含量较高,侵蚀发展较快,随着可流失细砂含量降低,侵蚀趋于收敛。而细砂流失也导致土层中产生了空洞区和松动区。

3 不同因素对渗流侵蚀的影响分析

尽管不同工况均具有上述侵蚀过程的共同特征,但各因素仍对侵蚀程度及空洞形成状态有一定影响。

3.1 土体饱和度的影响

图 7 为非饱和土与饱和土条件下砂土流失量的发展。可见,饱和度对侵蚀的影响很大,饱和土中的土流失量几乎是饱和土的 2~3 倍。这是因为相同条件下,非饱和土的水相渗透系数比饱和土低得多,渗流

力也较低, 因而细砂侵蚀量较少; 其次, 非饱和土中吸力和气泡的存在会使细粒流失通道更加曲折, 甚至被堵塞。因此非饱和土侵蚀程度小, 土骨架变形不大。

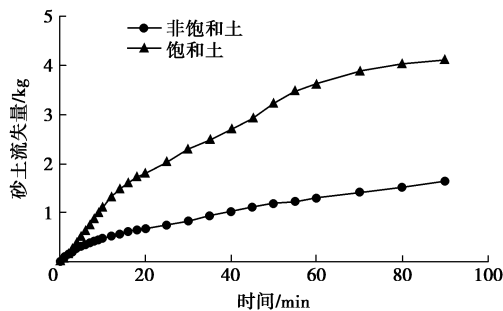
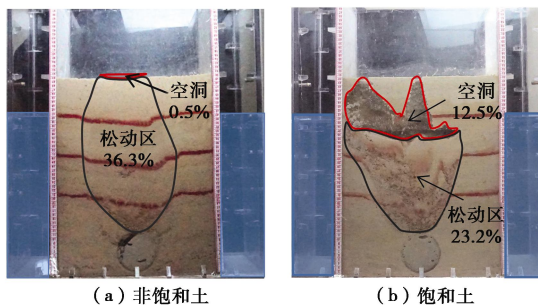


图 7 砂土流失量的发展 (C1, C3)

Fig. 7 Development of sand loss (C1, C3)

两者侵蚀量的巨大差异, 也将对空洞产生较大影响, 其侵蚀状态如图 8 所示。首先需说明的是土体是否饱和和只针对水位下土体, 水位上必然是非饱和土。可见饱和土中形成了空洞, 非饱和土只在地表产生沉降。因为饱和土水位下土体无吸力, 水位上土体不饱和和存在吸力而保持整体稳定, 水位界面处吸力极小, 所以水下土体沉降时, 两土层易脱离, 加上土拱效应, 将形成拱形空洞。对非饱和土, 水位上下土体均有吸力, 尽管水位上土体不受渗流作用, 即没有砂土流失导致的侵蚀沉降, 但水位下土体侵蚀沉降时, 界面处较大的吸力将带动上部土体发生共同沉降; 其次非饱和土渗流小, 水位上土体在重力作用下易发生沉降。由于沉降和空洞都是源于侵蚀土体的沉降, 可将沉降作为特殊的空洞形式, 以便分析。可以看出非饱和土空洞比饱和土小的多, 其面积仅占整个土体的 0.5%, 但松动区相对较大, 占土体面积的 36.3%。因此非饱和土中的砂土流失主要导致了大面积土体的松弛, 但渗流力较低, 使土骨架不易因渗流力作用产生变形。



(a) 非饱和土 (b) 饱和土
图 8 最终侵蚀状态 (C1, C3)

Fig. 8 Final states of erosion (C1, C3)

因此, 非饱和土不仅侵蚀量比饱和土小得多, 且不易产生隐伏空洞, 避免了地表的塌陷风险。但其松动土体将降低地基承载力, 产生的后期沉降不可忽略。

3.2 水位高度的影响

图 9 是不同水位条件下砂土流失量的变化。水位

越高, 侵蚀量越大, 基本和水位成正比。这是因为较高水位会产生较大的渗流力, 同时增大了渗流范围。而这些砂土流失均在前期发展最快, 只是水位越高, 前期快速侵蚀的持续时间越长, 越晚达到稳定状态。

而水位也对空洞的形成位置和形态产生较大影响。如图 10 所示, 空洞均形成于水位高度。所以当水位处于地下一定深度时, 产生的空洞也将处于地下土层, 此时空洞上方土层形成稳定的土拱, 地表无沉降, 如 20 cm 和 30 cm 水位工况, 这种空洞将引发地表突然塌陷事故。当水位接近地表时, 整个土体发生侵蚀沉降, 于是直接在地表产生巨大的沉降槽。同时水位越高, 侵蚀量越大, 空洞和松动区面积占比明显增加。

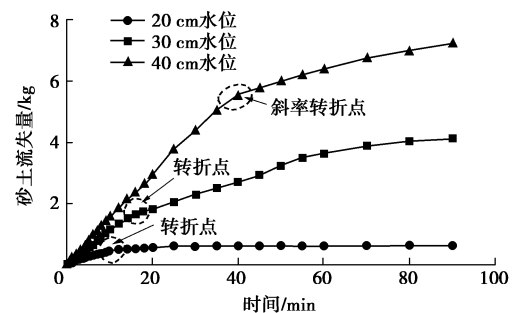


图 9 砂土流失量的发展 (C2, C3, C4)

Fig. 9 Development of sand loss (C2, C3 and C4)

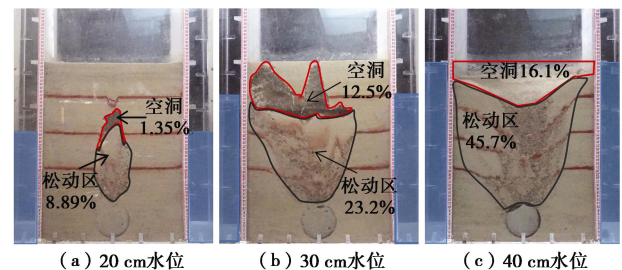


图 10 最终侵蚀状态 (C2, C3, C4)

Fig. 10 Final states of erosion (C2, C3 and C4)

可见, 水位越高, 水力梯度及渗流力越大, 对细颗粒的拖拽力和对通道的冲刷力也越大, 因此最终砂土流失和侵蚀区域越大, 且空洞常形成于水位高度处。

3.3 颗粒级配的影响

图 11 是不同级配土体的砂土流失变化曲线。

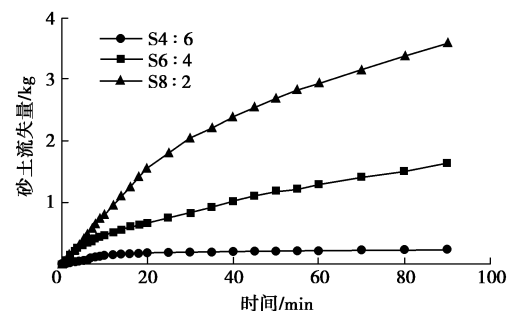


图 11 砂土流失量的发展 (C1, C5, C6)

Fig. 11 Development of sand loss (C1, C5 and C6)

可以看出, 初始细砂含量大的土体, 砂土流失量大, 且难达到稳定状态。因为粗粒含量高的土体形成的土骨架较稳定, 且细砂流失少, 不易发生侵蚀变形, 细粒流失路径稳定。而粗粒含量低的土体, 在侵蚀过程中不断发生骨架变形, 流失路径不断被堵塞或改变。

而级配也对空洞形成产生了极大影响。见图 12, 当细砂含量较低时, 如 S4:6 工况, 侵蚀基本不发生, 只在破损口处有较小侵蚀, 且土体骨架稳定, 因此没有产生空洞。而 S6:4 和 S8:2 侵蚀量较大, 均产生了地表沉陷, 且初始细砂含量越大, 侵蚀产生的变形沉降越大, 形成的松动区和空洞面积占比也越大。

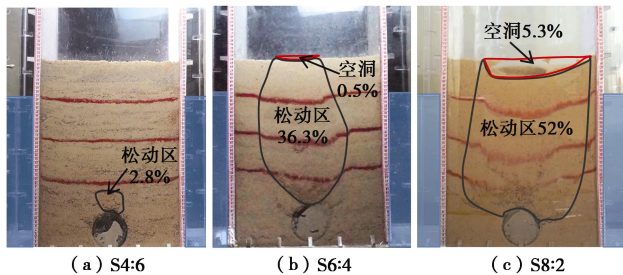


图 12 最终侵蚀状态 (C1, C5, C6)

Fig.12 Final states of erosion (C1, C5 and C6)

因此砂土的初始级配对渗流侵蚀量影响很大, 它决定了粗粒骨架的稳定程度和骨架间可流失细砂的含量。初始细砂含量越高, 砂土流失量越大, 土体侵蚀变形导致的地表沉陷及侵蚀区域也越大。事实上, 侵蚀过程就是土体级配不断变化的过程, 不同级配土体的侵蚀特征也代表了侵蚀过程不同阶段的侵蚀特征。

3.4 管道破损尺寸的影响

图 13 是不同破损尺寸条件下的砂土流失变化曲线。纵缝和环缝尺寸相同, 但均比流失孔大, 而两者的砂土流失量也比流失孔大, 说明破损口在保证只有细砂通过的条件下, 其尺寸越大, 土体侵蚀量越大。而纵缝和环缝虽然形式不同, 但由于尺寸相同, 侵蚀量也很接近, 说明破损形式对侵蚀影响很小。

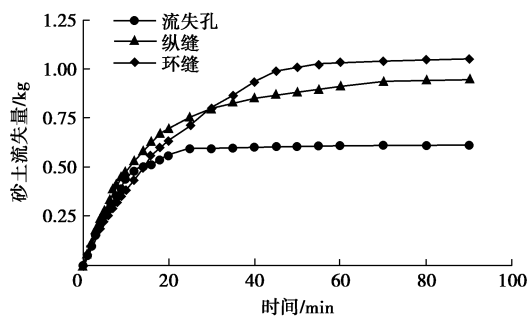


图 13 砂土流失量的发展 (C2, C7, C8)

Fig. 13 Development of sand loss (C2, C7 and C8)

同时也注意到, 在前 15 min 侵蚀的快速发展阶段, 3 种工况的砂土流失曲线基本重合, 说明在侵蚀发展过程中, 即使破损尺寸增大, 但是细砂流失速度

并没有明显增大。这是因为渗流力相同, 在其作用下的细砂流失速度也基本不变。不同的是, 破损尺寸越大, 侵蚀发展时间越长, 最终稳定时的砂土流失量越大, 说明更大范围的土体受到侵蚀而发生细砂流失。这是因为破损尺寸的增大, 增加了周围细粒流失路径的数量, 侵蚀的发展时间和影响范围也随之增大。

如图 14 所示, 对比不同破损口的最终侵蚀区域, 破损口尺寸增加, 会增大空洞及松动区的面积, 但增幅相对较小。同时三种工况由于水位相同, 产生的空洞位置也基本相同, 均位于破损口以上的水位高度处。

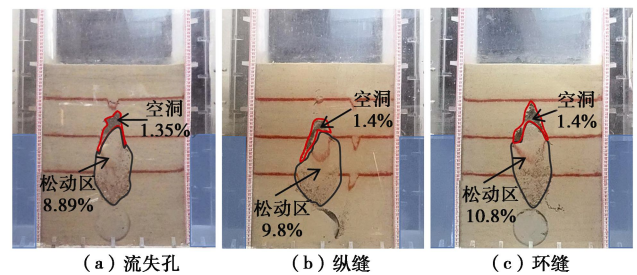


图 14 最终侵蚀状态 (C2, C7, C8)

Fig. 14 Final states of erosion (C2, C7 and C8)

因此, 破损尺寸的增加会增加侵蚀量和空洞大小, 破损形式则对侵蚀影响很小, 但综合来看, 管线破损尺寸对侵蚀的影响相对较小。

通过以上分析, 可将各因素的影响分为对渗流力的影响和对可流失细砂含量的影响。饱和度决定了渗透性, 水位决定了水头, 但两者都影响了渗流力的大小, 较大渗流力将增大侵蚀程度。而级配决定了细砂含量, 破损尺寸决定了受侵蚀影响的土体范围, 而两者都影响了可流失细砂的含量, 从而影响侵蚀量大小。

4 结 论

本文通过模拟不同饱和度、砂土级配、水位和管线破损尺寸条件下的破损管线渗流侵蚀过程, 得到侵蚀的发展过程和各因素的影响规律。初步结论如下:

(1) 渗流侵蚀开始于破损处, 并不断向上层扩展, 越靠近破损口, 细砂流失越严重。侵蚀过程可分为 3 个阶段: 快速侵蚀阶段、稳定侵蚀阶段和收敛阶段。最终在土体中产生了明显的松动区和空洞。

(2) 土体饱和度决定了渗透性和渗流力大小, 饱和土中产生了较大的土流失量和隐伏空洞, 而非饱和和只在地表产生了较小的沉陷。

(3) 水位高度决定了水头和渗流力, 高水位导致更多的砂土流失, 同时空洞常形成于水位高度处。

(4) 土体初始级配决定了骨架稳定程度和可流失细粒含量, 初始细砂含量越多, 侵蚀程度越大。

(5) 管线破损尺寸决定了破损口周围流失路径数量, 较大的破损口将产生更大范围的侵蚀。

参考文献:

- [1] 肖文兴, 钱劲松. 城市道路路基空洞区演变分析[J]. 交通科技, 2016(2): 125 - 127. (XIAO Wen-xing, QIAN Jin-song. Analysis of the evolution of subgrade cavity of urban road[J]. Transportation Science & Technology, 2016(2): 125 - 127. (in Chinese))
- [2] DELLE ROSE M, LEUCCI G. Towards an integrated approach for characterization of sinkhole hazards in urban environments: the unstable coastal site of Casalabate, Lecce, Italy[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2010, 7(2): 143 - 154.
- [3] 乔旭, 赵学军, 杨峰, 等. 城市道路路基病害核匹配追踪识别算法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 44 - 51. (ZHAO Xu, ZHAO Xue-jun, YANG Feng, et al. Urban road soil subgrade disease recognition by kernel matching pursuit[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 44 - 51. (in Chinese))
- [4] 李涛, 张子真, 宗露丹. 地下空洞引起土质地层地陷的形成机制与预测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1995 - 2002. (LI Tao, ZHANG Zi-zhen, ZONG Lu-dan. Study of formation mechanism and prediction of sinkholes in soil stratum induced by subterranean cavity[J]. Rock and Soil Mechanics. 2015, 36(7): 1995 - 2002. (in Chinese))
- [5] 李倩倩, 张顶立, 房倩. 含空洞地层初始破坏的复变函数解析研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2110 - 2117. (LI Qian-qian, ZHANG Ding-li, FANG Qian. Analytic solution to initial damage of cavern strata by complex function method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2014, 36(11): 2110 - 2117. (in Chinese))
- [6] SAURO U. Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification[J]. Acta Carsologica, 2003, 32(2): 41 - 52.
- [7] WEI Y, SUN S. Study on formation and expansion condition of hidden soil cavity under condition of groundwater exploitation in karst areas[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(7): 282.
- [8] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, TAIBOT J R. Filters for silts and clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(6): 701 - 718.
- [9] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(3): 420 - 423.
- [10] FANNIN R J, MOFFAT R. Observations on internal stability of cohesionless soils[J]. Géotechnique, 2015, 56(7): 497 - 500.
- [11] CHANG D S, ZHANG L M. A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(6): 579 - 589.
- [12] BINNER R, HOMBERG U, PROHASKA S, et al. Identification of descriptive parameters of the soil pore structure using experiments and CT data[C]// 5th International Conference on Scour and Erosion. San Francisco, 2010: 397 - 407.
- [13] HAGHIGHI I, CHEVALIER C, DUC M, et al. Improvement of hole erosion test and results on reference soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(139): 330 - 339.
- [14] 胡聿涵, 白玉川, 徐海珏. 近 10 年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J]. 公路, 2016(9): 130 - 135. (HU Yu-han, BAI Yu-chuan, XU Hai-jue. Analysis of reasons for urban road collapse and prevention and control countermeasures in recent decade of China[J]. Highway, 2016(9): 130 - 135. (in Chinese))
- [15] 桑野玲子, 佐藤真理, 瀬良良子. 地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討[J]. 地盤工学ジャーナル, 2010, 5(2): 219 - 229. (KUWANO R, SATO M, SERA R. Study on the detection of underground cavity and ground loosening for the prevention of ground cave-in accident[J]. Japanese Geotechnical Journal, 2010, 5(2): 219 - 229. (in Japanese))
- [16] SATO M, KUWANO R. Influence of location of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(4): 829 - 840.
- [17] KUWANO R, KOHATA Y, SATO M. A case study of ground cave-in due to large scale subsurface erosion in old land fill[C]// 6th International Conference on Scour and Erosion. Paris, 2012: 265 - 271.
- [18] 桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 等. 老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討[J]. 地盤工学ジャーナル, 2010, 5(2): 349 - 361. (KUWANO R, HORII T, YAMAUCHI K, et al. Formation of subsurface cavity and loosening due to defected old sewer pipe[J]. Japanese Geotechnical Journal, 2010, 5(2): 349 - 361. (in Japanese))
- [19] MUKUNOKI T, KUMANO N, OTANI J, et al. Visualization of three dimensional failure in sand due to water inflow and soil drainage from defective underground pipe using x-ray CT[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(6): 959 - 968.