

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.010

管道回填土粒径级配对土体侵蚀影响试验研究

蒋宇豪¹, 郭 帅¹, 吕耀志²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300051)

摘 要:为了深入探究排水管道回填土颗粒粒径与级配对土体侵蚀的影响,文章搭建长 0.5 m、宽 0.2 m、高 0.7 m 的排水管道沟槽试验模型,研究干燥状态下 4 种单一粒径均质砂层和 3 种不连续级配砂层的侵蚀敏感性。试验结果表明,对于均质砂层,随着颗粒粒径减小,依次出现直接阻塞、不完全侵蚀、完全侵蚀 3 种不同侵蚀类型,且不同侵蚀类型可以用临界孔口颗粒尺寸比来划分。通过对临界颗粒粒径砂层的 50 次重复试验,得出发生 3 种不同侵蚀类型的概率分别为 0.38、0.26、0.36。对于不连续级配砂层,侵蚀量与细颗粒质量比呈正相关关系,和粗颗粒与细颗粒的粒径之比(反映粗颗粒粒径的作用)呈负相关关系。研究成果可为排水管道周围地面塌陷灾害防治及风险评估提供理论依据。

关键词:排水管道;土体侵蚀;地面塌陷;粒径级配

中图分类号:TU992.03 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)03-0347-06

Experimental study on the influence of backfill soil gradation on soil erosion around defective sewers

JIANG Yuhao¹, GUO Shuai¹, LYU Yaozhi²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: In order to explore the influence of particle size and gradation of backfill soil on soil erosion around sewers, a test model of sewer grooves with length of 0.5 m, width of 0.2 m and height of 0.7 m was built. The erosion sensitivity of four kinds of uniformly-graded sands and three kinds of gap-graded sands under dry conditions was studied. The experimental results show that for the homogeneous sands, with the decrease of particle size, there are three different erosion types, including clogging, incomplete erosion and complete erosion, and the different erosion types can be classified by the critical ratio of the size of the orifice to the diameter of the particles. The probability of three different erosion types is 0.38, 0.26 and 0.36, respectively, according to 50 repeated tests on the critical particle size sands. For gap-graded sands, the amount of erosion particles is positively correlated with the content of fine particles, and negatively correlated with the ratio of coarse particle size to fine particle size. The research results provide a theoretical basis for the prevention and risk assessment of ground collapse around sewers.

Key words: sewer; soil erosion; ground collapse; particle size gradation

地下排水管道为城市重要的市政基础设施之一,是人们开展正常生活、生产的重要保障,然而由于其埋设于复杂的地质条件下,且易受地面荷载扰动、老化、施工不当等因素的影响,排水管道

容易发生结构退化,出现各种缺陷和破损口^[1]。管道破损口的存在不仅降低了管道的结构稳定性,而且往往成为管道内外物质交换的通道,进而引发管道周围土体的侵蚀,甚至导致出现地面塌

收稿日期:2021-05-12;修回日期:2021-06-22

基金项目:天津市重点研发计划资助项目(20YFZCSN01080);安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE211)

作者简介:蒋宇豪(1997—),男,浙江台州人,合肥工业大学硕士生;

郭 帅(1984—),男,河南商丘人,博士,合肥工业大学副研究员,硕士生导师,通信作者,E-mail:guoshuai@hfutedu.cn.

陷等严重后果^[2-3]。因此,管道周围土体侵蚀发生机理的研究,日益得到国内外研究者的重视。

在排水管道的管径、埋深、管材等设计参数确定后,排水管道回填土的性质,包括颗粒粒径与级配等,为影响管道结构稳定性和土体侵蚀敏感性的关键外部环境因素^[4]。颗粒粒径方面,文献^[5]用孔口颗粒尺寸比 D ,即破损口直径 D_0 与颗粒粒径 d_p 之比值($D=D_0/d_p$),作为评估侵蚀风险的关键参数之一,并对发生阻塞的临界尺寸比 D_c 进行试验研究;文献^[6]研究不同倾斜角和圆孔直径下的颗粒流流量,发现水平孔口下颗粒能否发生连续下落的临界孔口颗粒尺寸比 D_c 为 4,随着倾斜角增大,该临界值增加。文献^[7-8]使用 CT 扫描仪对试验土的相对密度和试验过程中形成的内部空腔进行可视化处理,并在后续试验中采用最大粒径 D_{max} 分别为 2.00、0.85、4.75 mm 的 3 种土进行试验,发现裂缝宽度 B 与 D_{max} 之比越大,侵蚀越严重;文献^[9]采用模型试验研究不同裂缝宽度下的土壤侵蚀量,发现侵蚀量随着裂缝宽度增加而增加,且土壤中的细颗粒更容易受到侵蚀,侵蚀土的细颗粒质量比大于原试验土;文献^[10]通过底部带孔口的容器进行模型试验,研究 4 种因素(砂砾粒径、孔口尺寸、水压、土壤高度)对土体侵蚀过程的影响,试验的孔口颗粒尺寸比 $D \geq 22.2$,发现砂样随着水流发生连续侵蚀,形成一个“碗状”结构的侵蚀坑;文献^[11]结合渗流公式提出新的计算水流量和砂流量的解析模型;文献^[12]通过模型试验模拟有纵向裂缝缺陷的排水管道土体侵蚀发展过程,采用 3 种不同粒径的均匀砂和 3 个不同尺寸的槽口,发现当裂缝宽度与粒径之比小于 3.1 时,砂流停止。

土壤颗粒级配对土体侵蚀影响方面,文献^[13]通过模型试验结合数值模拟,研究非饱和土的土壤侵蚀机理,发现在水力梯度的作用下,对于包含 $d_p=0.15$ mm 的细颗粒和 $d_p=3.00$ mm 粗颗粒的不连续级配砂土,细颗粒会通过粗颗粒的孔隙发生迁移、入渗;文献^[14]模型试验结果显示,试验土的初始细砂质量比越大,流失砂量越大,导致土体变形范围越大。文献^[14]采用的模型试验材料为澳大利亚污水处理规范《WSAAP》中规定的 2 种回填土,以 5 种不同的粒径级配进行对比试验,发现相比于粒径级配不良的土,约含 15%~20% 的中等大小颗粒的级配良好的土不易发生侵蚀;文献^[15]设计反映韩国排水管道埋设条件和实际规模的土室,采用符合韩国规

范规定粒径级配范围的 2 种回填土(不均匀系数 C_u 分别为 12.4、1.3)进行模型试验,发现不含细颗粒的均匀土比粒径级配良好土更容易发生侵蚀;文献^[16]采用不同粒径级配的 3 种土壤材料进行模型试验,研究初始含水量和相对密度对土体侵蚀的影响,提出随着细颗粒的流失,侵蚀过程中土壤内部会产生空腔和松动区,不同土壤松动区的面积和松动程度不同;文献^[17]总结了土壤内部侵蚀机理的数值模拟研究成果,发现相比于颗粒组成变化范围广的不均匀土,不连续级配土更容易发生内部侵蚀,其中细颗粒质量比 F 、粗颗粒与细颗粒的粒径之比 G 、相对密度 D_r 等为关键影响因素。

已有相关试验研究在均匀土的侵蚀机理方面成果较丰富,但对于不同级配土体的研究只限于某几种特定的级配曲线。为了探究不同粒径级配分布下的土体侵蚀机理,本文搭建排水管道沟槽试验模型,研究干燥状态下 4 种单一粒径均质砂层和 3 种不连续级配砂层通过排水管道缺陷口的侵蚀结果;并基于大量重复试验,得出临界孔口颗粒尺寸比 D_c 下,发生不同侵蚀类型的概率和侵蚀量分布曲线,以期推测地面塌陷风险概率提供参考。

1 模型试验研究

1.1 试验装置与材料

试验装置搭建于合肥工业大学水工模型试验大厅,试验模型示意图如图 1 所示。试验模型箱体的尺寸(长×宽×高)为 500 mm×200 mm×700 mm, DN100 排水管沿箱体底板中心穿过箱体,顶部中心开直径 $D_0=10$ mm 的圆形孔口,模拟管道缺陷。模型箱材料为透明有机玻璃,便于观察试验过程。其他配件包括 DN50 进水管及进水阀门、溢流阀门、排空阀门、压力传感器、排气阀门,用于在后续试验开展高地下水水位工况研究;本次试验研究仅关注干砂流动工况。

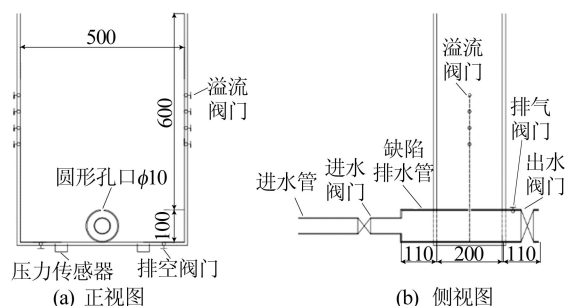


图 1 试验模型示意图

为了排除颗粒形状、黏性等其他影响因素对试验结果的干扰,试验材料采用标准球型非黏性玻璃砂。颗粒材料如图 2 所示(图 2 中,底部标尺单位为 cm)。

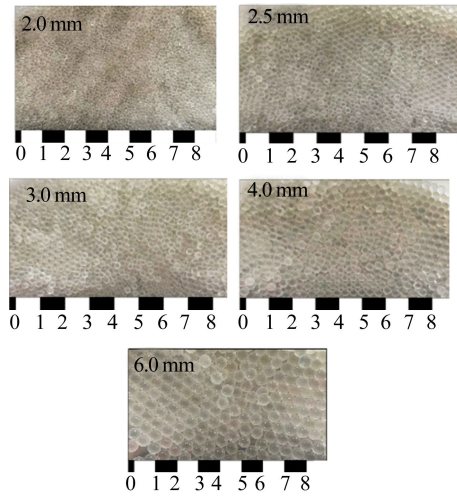


图 2 试验材料图片

已有研究表明,在孔口颗粒尺寸比 D 较大时,孔口上方会发生连续侵蚀^[10],但当颗粒粒径增大

时,颗粒在孔口处发生阻塞的概率也随之增大,目前对此类临界状态的研究报道很少。因此,本文选用颗粒粒径略小于孔口直径的 5 种玻璃砂,粒径分别为 (2.0 ± 0.1) mm、 (2.5 ± 0.1) mm、 (3.0 ± 0.1) mm、 (4.0 ± 0.1) mm、 (6.0 ± 0.1) mm;颗粒密度 ρ 分别为 2.523、2.462、2.506、2.479、2.461 g/mL。

1.2 试验工况与试验程序

本次试验主要研究颗粒粒径 d_p (孔口颗粒尺寸比 D)与砂层级配对排水管道回填土侵蚀敏感性的影响,所有试验工况见表 1 所列。

表 1 中,砂层高度 h_s 为砂层相对于排水管道管顶的高度。所有工况控制砂层的初始孔隙率为 0.4。工况 1~工况 4 为单一粒径的均质玻璃砂层试验工况,用于分析颗粒粒径的影响;工况 5~工况 16 采用 2 种不同粒径的玻璃砂按一定的质量比混合成不连续级配玻璃砂层,用于分析粒径级配的影响。为尽量减少与消除试验装载过程中带来的随机性影响,保证试验结果的可靠性,每个工况至少进行 3 次重复试验。

表 1 16 种试验工况

试验工况	颗粒粒径 d_p /mm	细颗粒质量比 F	孔口颗粒尺寸比 D	砂层高度 h_s /mm
工况 1~工况 4	2.0/2.5/3.0/4.0	1.0	5.0/4.0/3.3/2.5	50
工况 5~工况 8	2.0+3.0	0.2/0.4/0.6/0.8	10:3:2	100
工况 9~工况 12	2.0+4.0	0.2/0.4/0.6/0.8	10:4:2	100
工况 13~工况 16	2.0+6.0	0.2/0.4/0.6/0.8	10:6:2	100

试验具体步骤如下:① 称量,使用电子秤(精度为 1 g)将颗粒按设定的粒径和粒径级配进行称量,并将颗粒混合均匀;② 装填,用胶带封住缺陷口,按设定的砂层高度和初始孔隙率装填并压实;③ 侵蚀,打开缺陷口,颗粒发生侵蚀,记录每种粒径颗粒的累积侵蚀质量,并拍摄侵蚀过程视频;④ 重复试验,将颗粒取出后重新混合,重复装填,开始重复侵蚀试验。

2 试验结果与讨论

2.1 侵蚀类型划分

试验观察到 3 种不同程度的侵蚀现象,可根据如下 2 个临界侵蚀量值进行侵蚀类型的划分:砂层顶部开始出现侵蚀空腔的侵蚀量值 S_1 、侵蚀空腔发展到孔口的侵蚀量值 S_2 。

(1) 直接阻塞。侵蚀量 $S < S_1$,打开缺陷口时落下少量颗粒后,出口处形成稳定的阻力拱,侵蚀未发展到砂层顶部。

(2) 不完全侵蚀。 $S_1 < S < S_2$,打开缺陷口后颗粒连续入落,落下一定量的颗粒后,由于出口阻力拱的形成,砂流停止,并在砂层顶部观察到体积较小的空腔。

(3) 完全侵蚀。 $S_2 < S$,打开缺陷口后颗粒连续入落,直至缺陷口正上方“倒圆锥形”区域内所有颗粒流出。

2 种类型的侵蚀空腔形态如图 3 所示。

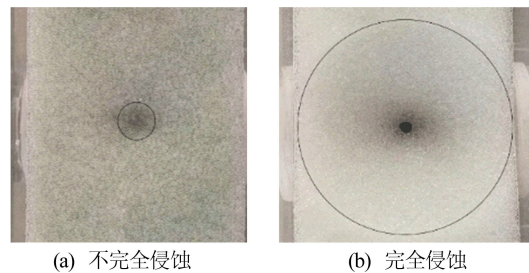


图 3 2 种侵蚀空腔的最终形态

文献[5]研究表明,颗粒在重力影响下通过孔口下落时,阻力拱的形成存在随机性,可描述为概率模型;且装载过程会导致土层中颗粒排列的随机性,因此本文的每次重复试验都得到不同的侵蚀量结果和侵蚀空腔形态。

2.2 颗粒粒径的影响

对于单一粒径的均质砂层,孔口颗粒尺寸比 D 为影响侵蚀结果的关键因素。16 种工况的重复试验结果如图 4 所示。

由图 4a 可知,在工况 1~工况 4 下, $d_p = 2.0$ mm 时,发生 3 次完全侵蚀,平均侵蚀量为 945.33 g; $d_p = 2.5$ mm 时,发生 1 次完全侵蚀、1 次直接阻塞和 1 次不完全侵蚀,平均侵蚀量为

286.41 g; $d_p = 3.0$ mm 时,发生 3 次直接阻塞,平均侵蚀量为 1.49 g; $d_p = 4.0$ mm 时,发生 3 次直接阻塞,平均侵蚀量为 0.78 g。由此可见,随着颗粒粒径 d_p 增加,平均侵蚀量减小,且侵蚀类型由完全侵蚀转变为直接阻塞。

已有研究表明,孔口上方的颗粒受重力影响下落时,由于阻力拱的形成发生阻塞的概率为孔口颗粒尺寸比 D 与孔口上方颗粒总数的函数^[5]。

本文试验中,在砂层高度不变的情况下,阻塞概率随着 D 减小而增加,在 $D=4$ 时,观察到 3 种不同程度的土壤侵蚀, $d_p = 2.5$ mm 为主要侵蚀类型发生转变的临界尺寸。

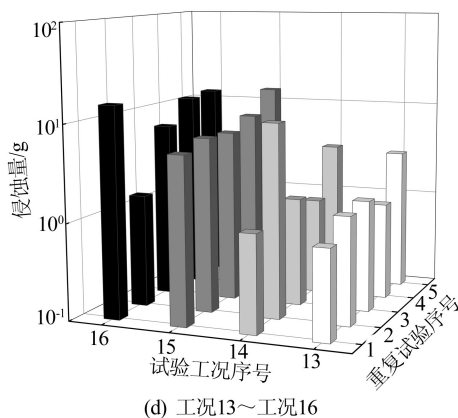
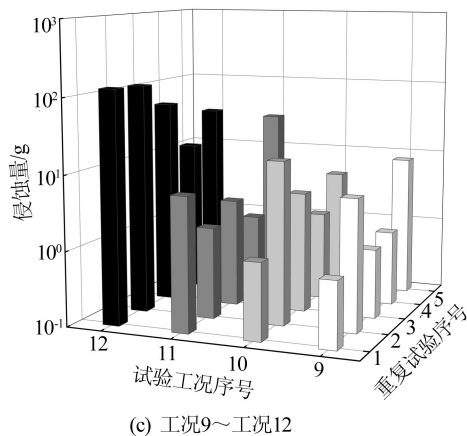
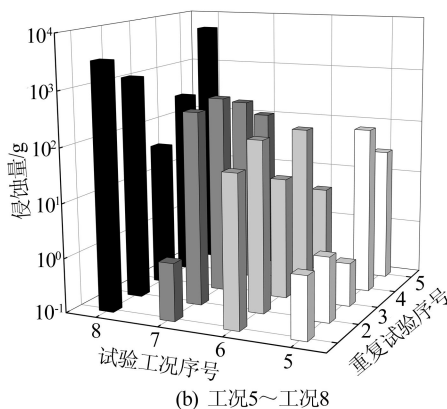
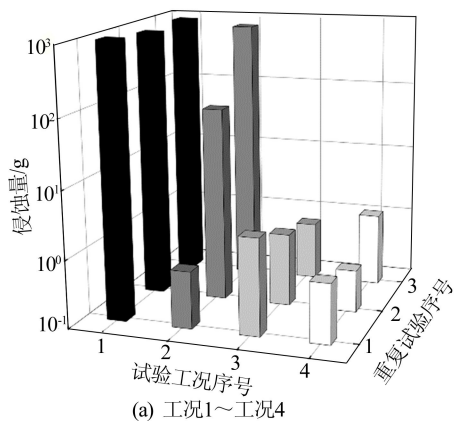


图 4 16 种试验工况下的侵蚀量结果

2.3 粒径级配的影响

对于由 2 种不同粒径的玻璃砂混合而成的不连续级配砂层, F 、 G 为影响侵蚀结果的关键因素。由图 4b~图 4d 可知,每个工况下的重复试验得到的侵蚀量结果波动较大,但当 $G=2$ 、 $F \leq 0.4$, 或 $G=3$ 、 $F \leq 0.8$ 时,试验结果均为直接阻塞。本试验的孔口直径和细颗粒粒径保持不变,说明土层中包含一定质量比的粗颗粒时,不容易

发生土体侵蚀。其原因是粗颗粒较容易在缺陷孔口处形成稳定的阻力拱,使颗粒流停止。

工况 5~工况 16 平均侵蚀量变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知:平均侵蚀量随着原试验土细颗粒质量比 F 的增加而增加;随着 G 由 1.5 增加至 2.0、3.0,工况 5、工况 9、工况 13,工况 6、工况 10、工况 14,工况 7、工况 11、工况 15,工况 8、工况 12、

工况 16 的平均侵蚀量依次减小,说明平均侵蚀量随着 G(反映粗颗粒粒径的作用)的增加而减小。

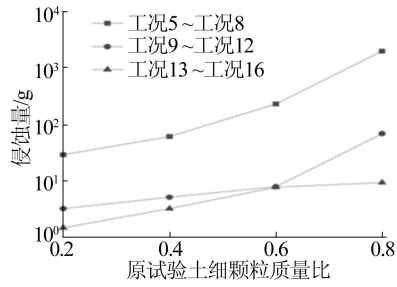


图 5 工况 5~工况 16 平均侵蚀量变化曲线

2.4 侵蚀土与原试验土级配对比

工况 5~工况 16 下,侵蚀土(定义为每次试验收集的通过缺陷孔口侵蚀进入排水管道的颗粒)中细颗粒质量比和原试验土中细颗粒质量比对比如图 6 所示。

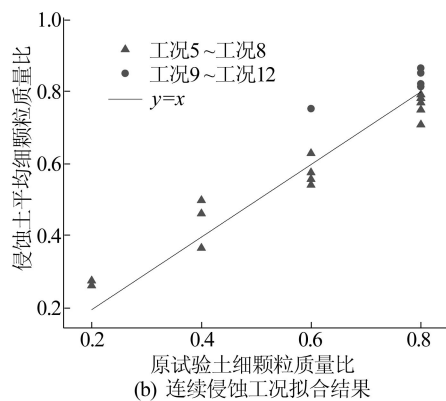
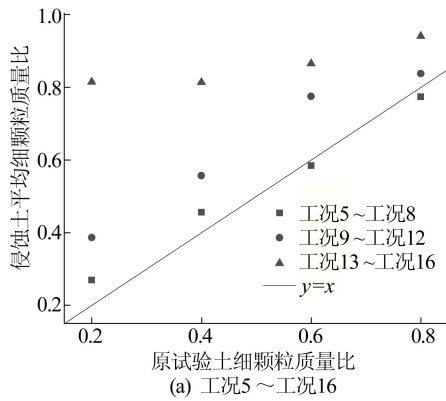


图 6 侵蚀土与原试验土级配对比结果

由图 6a 可知,随着 G 增加,侵蚀土级配逐渐偏离原试验土级配,如工况 5、工况 9、工况 13 侵蚀土平均细颗粒质量比分别为 0.27、0.39、0.82。其原因是:工况 5~工况 8 的侵蚀类型以不完全侵蚀为主,工况 9~工况 12 的侵蚀类型以直接阻塞为主,而工况 13~工况 16 试验结果全为直接阻塞;发生直接阻塞时细颗粒相对容易发生侵蚀,

且装载过程中造成的颗粒排列方式的随机性影响较大。图 6b 显示了重复试验中发生连续侵蚀(包括不完全侵蚀和完全侵蚀)时侵蚀土与原试验土的粒径级配对比。从图 6b 可以看出,试验结果与 $y = x$ 直线的拟合结果较好,拟合优度 $R^2 = 0.895$,说明发生连续侵蚀时侵蚀土级配接近原试验土级配。

2.5 临界颗粒粒径下的侵蚀类型分布

由 2.2 节可知,对于均质砂层, $d_p = 2.5 \text{ mm}$ 为主要侵蚀类型发生转变的临界颗粒粒径。因此,对工况 2 进行 50 次重复试验,试验结果如图 7 所示。将试验所得侵蚀量从小到大进行排列,并依据 2.1 节所述侵蚀类型的划分方法,可将侵蚀量曲线划分为 3 个不同的区域:直接阻塞区、不完全侵蚀区、完全侵蚀区。工况 2 下发生直接阻塞、不完全侵蚀、完全侵蚀的概率分别为 0.38、0.26、0.36,对应该理想土样下发生不同程度的地面塌陷概率为 0.62。

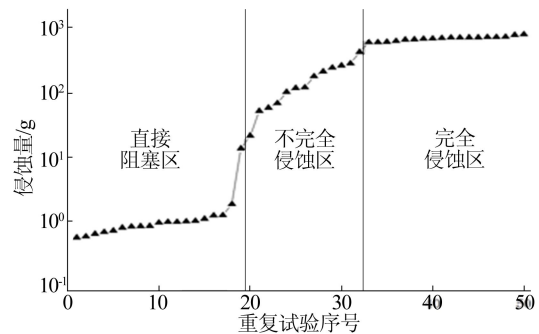


图 7 工况 2 下 50 次重复试验侵蚀量曲线

3 结 论

(1) 本文通过实验室模型试验研究不同颗粒粒径和粒径级配下砂层的土体侵蚀敏感性,观察到直接阻塞、不完全侵蚀、完全侵蚀 3 种不同程度的土体侵蚀。

(2) 不同颗粒粒径的均质砂层试验结果表明,孔口颗粒尺寸比为 4 时,主要侵蚀类型发生转变;通过对该临界尺寸比下砂层的 50 次重复试验,得出发生直接阻塞、不完全侵蚀、完全侵蚀的概率分别为 0.38、0.26、0.36。

(3) 不同不连续级配砂层试验结果表明,侵蚀量随着原试验土细颗粒质量比 F 的增加而增加,随着原试验土粗颗粒与细颗粒的粒径之比 G (反映粗颗粒粒径的作用)的增加而减小,且发生连续侵蚀时侵蚀土级配接近原试验土级配。

(下转第 407 页)

- ae in dehydrated powdered infant formula[J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(9): 2111-2117.
- [14] JOVANOVIĆ G, LLOYD L J, STUMPF M P, et al. Induction and function of the phage shock protein extracytoplasmic stress response in *Escherichia coli*[J]. Journal of Biological Chemistry, 2006, 281(30): 21147-21161.
- [15] 郭晶晶, 王慧珠, 滑明溪, 等. 以铜绿假单胞菌为例利用16S测序技术进行细菌同源基因型分析应用价值探讨[J]. 标记免疫分析与临床, 2020, 27(10): 1690-1693.
- [16] 王艳君, 冯永其, 徐静. 东非黑白疣猴肺炎克雷伯氏菌的分离鉴定[J]. 上海畜牧兽医通讯, 2018(5): 14-15.
- [17] HEWS C L, CHO T, ROWLEY G, et al. Maintaining integrity under stress: envelope stress response regulation of pathogenesis in gram-negative bacteria [J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2019, 9: 313-313.
- [18] 赵位, 喻东, 程建国, 等. 肺炎克雷伯氏菌毒力因子及其基因组学研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(6): 942-949.
- [19] KOBOYASHI H, YAMAMOTO M, AONO R. Appearance of a stress-response protein, phage-shock protein A, in *Escherichia coli* exposed to hydrophobic organic solvents[J]. Microbiology, 1998, 144: 353-359.
- [20] 孟祥潮, 刘国富, 刘营, 等. 通用型植物 GFP 标签蛋白表达载体的构建和蛋白质的细胞内定位研究[J]. 中国生化药物杂志, 2016, 36(5): 28-31.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 351 页)

本文试验成果可为实际排水管道回填施工提供理论依据,若对管道回填土中细颗粒质量比的上限作出规定,则可有效预防地面塌陷灾害。

[参 考 文 献]

- [1] DAVIES J P, CLARKE B A, WHITE R J T, et al. Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes[J]. Urban Water, 2001, 3(1/2): 73-89.
- [2] 郭帅. 城市排水系统地下水入渗及土壤侵蚀问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [3] 侯超群, 董满生, 逢焕平. 松散土体地面塌陷成因分析及机理研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 63-67.
- [4] INDIKETIYA S, JEGATHEESAN P, RAJEEV P, et al. The influence of pipe embedment material on sinkhole formation due to erosion around defective sewers[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 19: 110-125.
- [5] JANDA A, ZURIGUEL I, GARCIMARTIN A, et al. Jamming and critical outlet size in the discharge of a two-dimensional silo[J]. EPL (Europhysics Letters), 2008, 84(4): 44002-1-44002-6.
- [6] SHELDON H G, DURIAN D J. Granular discharge and clogging for tilted hoppers [J]. Granular Matter, 2010, 12(6): 579-585.
- [7] 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.
- [8] 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): 85-100.
- [9] GHULAM A N, NILE B K, AL-BAIDHANI J H. Evaluation of the effect of leak size of defective sewer pipes on soil erosion[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2018, 13: 10708-10712.
- [10] GUO S, SHAO Y, ZHANG T Q, et al. Physical modeling on sand erosion around defective sewer pipes under the influence of groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(12): 1247-1257.
- [11] GUO S, ZHU D Z. Soil and groundwater erosion rates into a sewer pipe crack[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(7): 06017008-1-06017008-5.
- [12] TANG Y, ZHU D Z, CHAN D H. Experimental study on submerged sand erosion through a slot on a defective pipe [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(9): 04017026-1-04017026-14.
- [13] ZHANG D M, DU W W, PENG M Z, et al. Experimental and numerical study of internal erosion around submerged defective pipe [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103256.
- [14] ZHANG D M, DU W W, GAO C P. Model test of seepage erosion around defective buried pipelines[C]//HU L B, GU X Q, TAO J L, et al. Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Multi-physics Processes in Soil Mechanics and Advances in Geotechnical Testing. Singapore: Springer, 2018: 261-270.
- [15] KWAK T Y, WOO S I, KIM J, et al. Model test assessment of the generation of underground cavities and ground cave-ins by damaged sewer pipes[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(3): 586-600.
- [16] SATO M, KUWANO R. Model tests for the evaluation of formation and expansion of a cavity in the ground[C]// Proceedings of Seventh International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. [S. l.]: CRC Press, 2010: 581-586.
- [17] WANG X K, TANG Y, HUANG B, et al. Review on numerical simulation of the internal soil erosion mechanisms using the discrete element method[J]. Water, 2021, 13(2): 169.

(责任编辑 张淑艳)