

DOI: 10.11779/CJGE20221400

间断级配散粒土侵蚀过程及强度演变机理研究

梁越^{1,2}, 龚胜勇^{*2}, 杨咏梅³, 许彬^{1,2}, 张斌², 喻金桃²

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074;

3. 江西省赣南航道事务中心, 江西 赣州 341000)

摘要: 旨在探究相同应力条件下不同密实度间断级配散粒土管涌侵蚀机理及其侵蚀后强度变化特性, 制备干密度为 1.80, 1.84, 1.88 g/cm³ 的 3 种土体试样, 通过管涌三轴试验深入地探讨了干密度对其破坏临界水力梯度、累计涌砂量、体积变化量及侵蚀后强度变化的影响规律。研究表明: 试样破坏临界水力梯度随其干密度增大而增大, 且利用 Terzaghi 公式 (F1)、毛昶熙公式 (F2) 及水利水电科学研究院公式 (F3) 对其渗流临界水力梯度进行分析, 发现在该应力环境下各公式计算结果与试验结果均较接近 (优劣度为 F2> F3> F1)。试样累计涌砂量与体积变化量均与其干密度呈负相关性变化趋势, 其涌砂速率随管涌侵蚀不断发展而逐渐衰减; 土的强度受干密度与侵蚀率二者影响, 表现为侵蚀后土体强度折减程度随侵蚀进行而逐渐增加, 随干密度增大而减小。

关键词: 间断级配散粒土; 干密度; 管涌三轴试验; 破坏临界水力梯度; 抗剪强度

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)03-0632-08

作者简介: 梁越(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事水利工程灾变机理及防治技术等方面的教学与科研工作。E-mail: liangyue2560@163.com。

Erosion process and strength evolution mechanism of gap-graded cohesionless soil

LIANG Yue^{1,2}, GONG Shengyong², YANG Yongmei³, XU Bin^{1,2}, ZHANG Bin², YU Jintao²

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Gannan Waterway Affairs Center of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China)

Abstract: To explore the piping erosion mechanism and strength change characteristics of gap-graded cohesionless soil with different dry densities under the same stress condition, three kinds of soil samples with the dry densities of 1.80, 1.84 and 1.88 g/cm³ are prepared, and the effects of the dry densities on the disruption of the critical hydraulic gradient, cumulative sand gushing, volume change and strength change after erosion are studied through the piping triaxial tests. The study shows that the disruption of the critical hydraulic gradient of the samples increases with the increase of the dry density, and the disruption of the critical hydraulic gradient of seepage is analyzed by using the Terzaghi formula (F1), Mao Changxi formula (F2) and China Institute of Water Resources and Hydropower Research formula (F3). It is found that the calculated results by them are close to the experimental results in this stress environment (the degree of advantages is F2 > F3 > F1). The cumulative sand gushing amount and volume change of the samples show a negative correlation with the dry density, and its sand gushing rate gradually attenuates with the continuous development of piping erosion. The strength of soil is affected by both the dry density and the erosion rate, that is, the degree of strength reduction of soil increases with the erosion and decreases with the increase of the dry density.

Key words: gap-graded cohesionless soil; dry density; piping triaxial test; disruption of critical hydraulic gradient; shear strength

0 引言

土体的管涌侵蚀是在一定水力条件下, 细颗粒通过粗颗粒之间孔隙通道发生运移流失, 从而导致土体失稳、坍塌的现象, 多发生在断级配的无黏性土体中。土体的管涌侵蚀往往会导致堤坝、基坑、边坡等发生

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52379097); 国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金重点项目 (SLK2023A03); 重庆市技术创新与应用发展专项基金项目 (CSTB2022TIAD-GPX0045); 重庆交通大学博士后科学基金项目 (22JDKJC-A008); 重庆交通大学研究生科研创新项目 (2022S0024)

收稿日期: 2022-11-11

***通信作者** (E-mail: shengyong0211@163.com)

失稳破坏造成巨大损失。据研究表明,全球大约有一半的大坝事故是由于管涌造成的^[1]。因此,研究土壤管涌侵蚀及其发展过程,对保障人民生命财产安全具有十分重要的意义^[2]。

一般地,土体管涌侵蚀是涉及孔隙水渗流、可动细颗粒侵蚀运移、多孔介质变形、土体应力重分布的多相、多场耦合的复杂过程,管涌侵蚀的发生和发展与水力条件(渗流方向、水力梯度、水头形式)、土体的物理几何条件(孔隙率、密实度、级配、颗粒形状)以及应力状态等因素密切相关^[3-4]。许多学者针对以上影响管涌因素开展了大量的研究^[5]。其中,谷敬云等^[6]基于 PLIF 技术研制了潜蚀可视化试验装置,这为研究管涌在发生发展过程中土体内部细颗粒的运移、淤堵等细观现象提供了较好的方案。梁越等^[7]和 Liang 等^[8-9]研究了不同渗流方向、粒径分布和干密度土壤中的管涌侵蚀,分别定义了与细颗粒局部移动和整体损失相对应的低、高临界水力梯度,并进一步分析了不同粒径分布以及干密度对临界水力梯度的影响。吴梦喜等^[10]通过三轴和侧限压缩试验研究了颗粒流失量对应力-应变关系的影响,结果表明颗粒流失降低了土体的强度和变形模量。钟世英等^[11]、徐日庆等^[12]进行了初始相对密实度对砂土侵蚀过程以及强度特性影响研究,并建立了砂土抗剪强度指标与初始相对密实度之间的关系,进而考虑初始密实度对莫尔-库仑理论进行修正。詹美礼等^[13-14]、凌华等^[15]研究了复杂应力条件下堤基以及砾石土料等的渗流特性,分析发现应力状态对土料的渗透系数、临界坡降具有显著的影响。Akihiro 等^[16]、Mao 等^[17]采用向下渗流研究了土体在管涌发生前后的强度变化规律以及不同细颗粒含量对管涌前后强度变化的影响程度。目前,学者们对土体的管涌侵蚀进行了大量研究并取得了很好的成果。但有的研究忽略了应力条件的影响,亦或是缺乏管涌侵蚀对散粒土强度影响的研究。部分研究考虑了应力条件的影响也是基于连续级配的土样开展研究的且其考虑的是向下渗流方向。但在自然环境中,向上渗流的侵蚀往往比向下渗流的侵蚀更为常见,且土壤的不均匀系数往往很大,级配组成大都为缺乏中间粒径的间断级配^[8, 18]。基于此,利用自研试验设备开展间断级配土样在考虑应力环境下的向上的管涌侵蚀试验具有现实工程意义。另外,本试验系统的优点在于在试验过程中不仅可以通过土体的应力环境变化得到土体强度的变化趋势,还可以监测土样体积变化趋势。这有助于更好地掌握土体发生管涌侵蚀后体积和强度变化特征。

鉴于此,拟在上述研究基础上,利用自研管涌三轴试验系统,通过室内管涌三轴试验,结合精细化量

测方法,对相同应力条件下的不同密实度状态散粒土试样管涌侵蚀中水力特性、细颗粒流失规律以及管涌侵蚀后砂样强度变化等进行研究。以期为堤防等散粒土管涌危险评价提供参考。

1 试验设计方案

1.1 试验材料

试验所用的土体采自三峡库区重庆某河段,利用筛分机得到试验土样,粒径组别分别有 0.075~0.25, 1~2, 2~5, 5~8, 8~10 mm, 各粒径段土样照片如图 1 所示。本试验中将粒径为 0.075~0.25 mm 颗粒划分为细颗粒,侵蚀前土样及涌出砂样照片见图 2。通过控制干密度,设置了 A、B、C 3 种不同干密度的试样开展试验,试样级配曲线见图 3。根据 Kenney 等^[19]提出针对间断级配土的管涌型土和流土判别方法,本次试验土样为管涌型土。

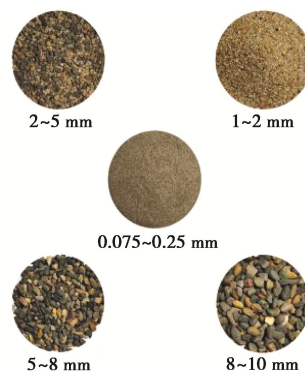


图 1 土样照片

Fig. 1 Photos of soil samples

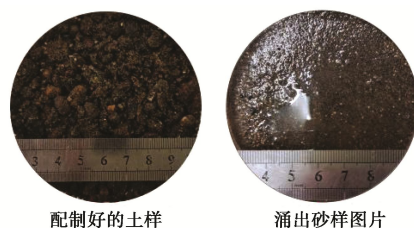


图 2 侵蚀前土样与涌出砂样

Fig. 2 Soil samples and photos of gushing sand samples

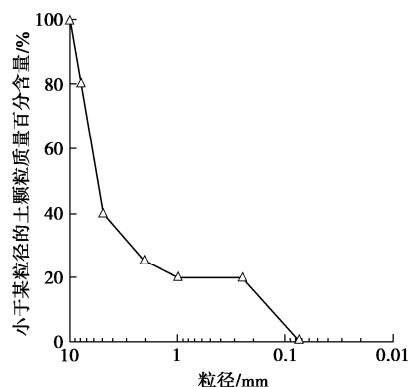


图 3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves

1.2 试验装置

试验装置如图 4 所示，主要由上游供水装置、围压控制装置、体积监测装置、轴压加载装置、砂水分离装置、围压室以及数据采集与存储系统组成^[8]。上游供水系统主要由带测压管的活動水箱组成，通过水箱的升降改变向上水力梯度大小。电子天平可通过监测水气交换罐中质量的变化量间接得到侵蚀过程中试样体积的变化。轴压加载系统和围压控制装置通过外接空压机改变压力大小，以模拟不同的应力环境。围压室主要由外部密封装置以及试样密封装置构成，试样装填室高为 200 mm，直径为 100 mm，且其底部和顶部均设置一层多孔薄板，达到试验时对试样起缓冲保护作用。砂水分离装置中的称重传感器用于精确采集涌砂量和渗流流量数据。

1.3 试验工况

本次试验中实际上是通过控制试样的干密度来研究密实度对土体渗透破坏的影响。参照 Liang 等^[8-9]已有研究，本次试验中试样 A、B、C 干密度分别为 1.80，1.84，1.88 g/cm³。并采用向上渗流的方式以模

拟竖向管涌侵蚀方向。为了量化试样受侵蚀的程度，这里将流失细颗粒含量所占原细颗粒含量的百分比定义为侵蚀率。针对 A、B、C 3 种不同干密度试样分别设置 9 组不同侵蚀率试验，如表 1 所示。其中 A-1、B-1、C-1 作为对照组的侵蚀率为 0.00%。在侵蚀过程中施加的轴压与围压分别为 50，23 kPa，试样所受偏应力为 27 kPa。

1.4 试验流程

(1)试样制备与饱和。筛选出预定粒径组合的土料并将其搅拌均匀，搅拌过程中按照各试验组的密实度掺入 4%干土质量的水。将拌合均匀的土样分 5 层装填并逐一击实，每一层厚度为 40 mm，土样装填完毕后将装样装置进行密封。采用水头法对土样进行饱和，试验中缓慢抬升上游水箱高度，直至水位到达试样顶部时停止抬升上游水箱^[20]。

(2)压力加载与试样固结。试样饱和后以 2 kPa/min 的加载速率对试样进行围压加载，围压加载至 25 kPa 后停止加载并保持不变，调节控制阀缓慢加载竖向压力，加载速率仍为 2 kPa/min，当轴压达到

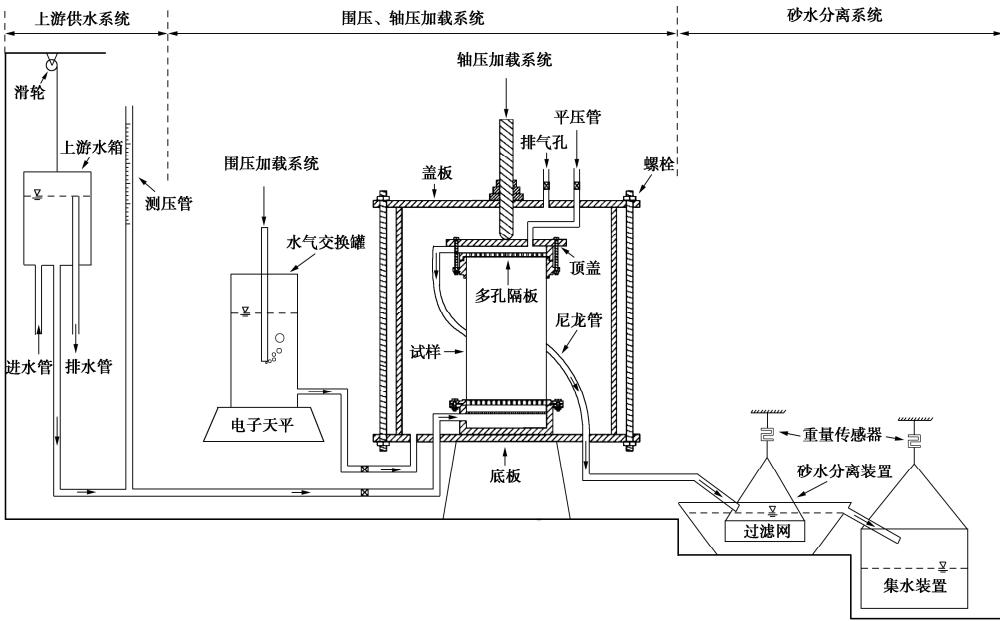


图 4 试验装置图

Fig. 4 Diagram of test devices

表 1 试验工况分组

Table 1 Grouping of test conditions

编号	侵蚀率/%	编号	侵蚀率/%	编号	侵蚀率/%
A-1	0.00	B-1	0.00	C-1	0.00
A-2	5.20	B-2	4.40	C-2	4.10
A-3	7.10	B-3	5.80	C-3	6.00
A-4	10.40	B-4	7.80	C-4	9.00
A-5	15.20	B-5	9.20	C-5	10.70
A-6	20.40	B-6	14.00	C-6	15.30
A-7	25.60	B-7	19.80	C-7	20.00
A-8	30.80	B-8	24.70	C-8	25.10
A-9	31.65	B-9	30.91	C-9	30.19

54.4 kPa 时停止加载。在该应力状态下维持 4 h 将试样进行固结^[20]。

(3)试样侵蚀破坏阶段。在开展侵蚀破坏试验之前,预先试验得到 3 种干密度试样发生管涌破坏的临界水力梯度。试样固结完成后,初始阶段以 2.0 cm/10 min 的速度增加上游水头,在靠近临界水力梯度时以 1.0 cm/10 min 的速度增加上游水头至预试验获得的临界水力梯度后保持恒定^[8]。通过重量传感器采集涌砂量和渗流流量,同时通过水气交换罐中体积的变化量得到试样体积的变化量。

(4)侵蚀试样的剪切破坏。当累计涌砂量达到预设值时,保持轴压不变,逐渐减小围压至试样发生剪切破坏,并记录试样发生破坏时的围压数值。

2 试验结果及分析

2.1 管涌过程中散粒土水力特性分析

图 5, 6 分别绘出了试样 A、B、C 在试验过程中渗流流量随时间变化曲线和渗流流速随水力梯度的变化过程。试验在 0 至 200 min 期间,渗漏流量逐渐增加,该阶段中会出现部分细小颗粒开始缓慢流失现象。试验在进行至 200 分钟后,侵蚀通道逐渐扩大为稳定的渗流通道,渗流流量开始趋于稳定。由图 6 可看到 A、B、C 试样的破坏临界水力梯度分别为 0.83, 0.87, 0.885, 破坏临界水力梯度随干密度增大而增大。在水力梯度逐渐增加至临界水力梯度值期间,渗流流速与水力梯度呈明显的线性关系,这与达西定律相符。达到破坏临界水力梯度后,渗流流速出现陡增的情况,其中, A-9 流速增加至 0.45 cm/s 左右便不再增加, B-9 流速增加至 0.41 cm/s 左右便不再增加, C-9 流速增加至 0.40 cm/s 左右便不再增加, 3 种试样最终的渗流流速相差不大, 且渗流不再符合达西定律。可能是因为随着细颗粒流失加剧, 试样内部逐渐形成了稳定的管涌通道。为验证渗透破坏试验临界水力梯度的关系, 选用 3 个理论公式进行比较, 其中:

Terzaghi^[21]提出了经典的临界水力梯度计算公式(F1), 根据土力学三相换算可得到下式:

$$i_{cr} = (G_s - 1)(1 - n) \quad (1)$$

式中: G_s 为土样相对质量密度; n 为土样孔隙率。

毛昶熙等^[22-23]根据单个颗粒的受力平衡条件, 提出了管涌冲动某一粒径级 d_f 的临界水力梯度计算式(F2)为

$$i_{cr} = \frac{d_f}{P_f d_{100}} (1 - n)(G_s - 1) \quad (2)$$

式中: d_i 为占总土重 $i\%$ 所对应的土粒粒径, 例如 d_5 为占总土重 5% 所对应的土粒粒径; P_f 为细颗粒含量, 即 d_f 对应粒径大小所占质量百分比; 其中 d_f 为

$$d_f = 1.3 \sqrt{d_{85} \cdot d_{15}} \quad (3)$$

水利水电科学研究院公式^[24]则考虑了土体受自重、静水浮力和渗透力的 3 种力作用, 并基于单颗粒的三力平衡提出了级配不连续型土的临界水力梯度公式(F3):

$$i_{cr} = 2.2(1 - n)^2 (G_s - 1) \frac{d_5}{d_{20}} \quad (4)$$

试验土样参数及理论公式计算结果如表 2 所示。

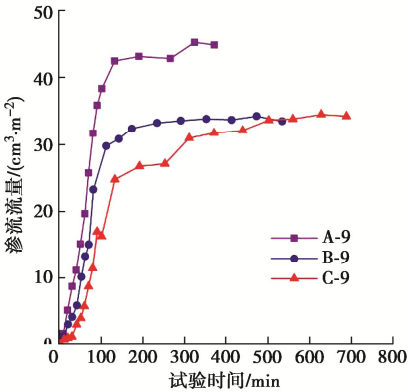


图 5 侵蚀过程中渗流流量的变化过程
Fig. 5 Variation process of seepage flow during erosion

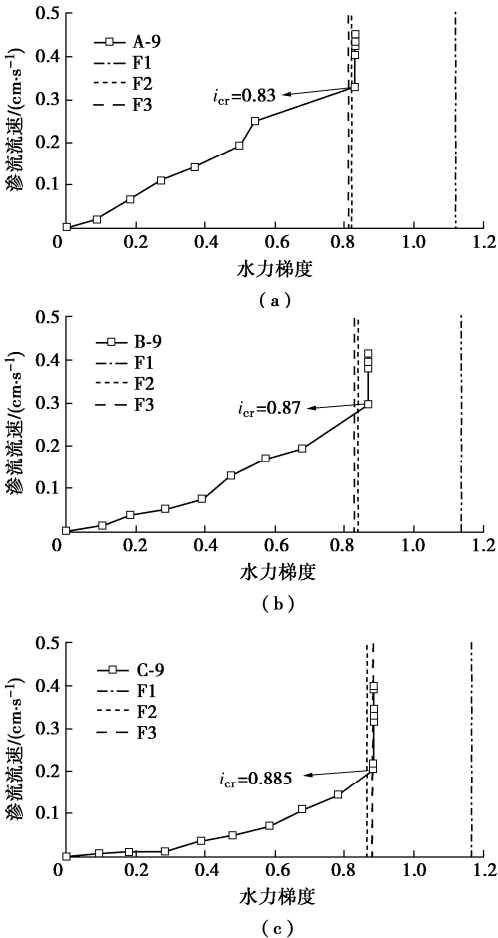


图 6 临界水力梯度实测值与理论值对比
Fig. 6 Comparison between measured and theoretical values of critical hydraulic gradient

表 2 土样的特征参数及理论公式计算结果

Table 2 Characteristic parameters of soil samples and calculated results of theoretical formulas

试样	粒径/mm					F1	F2	F3
	d_5	d_{15}	d_{20}	d_{85}	d_f			
A						1.12	0.82	0.81
B	0.12	0.21	0.25	8.5	1.74	1.14	0.84	0.83
C						1.17	0.86	0.88

理论值与实际渗流水力梯度的变化曲线对比见图 6, 值得注意的是, 本文认为渗流流速陡增的转折点所对应的水力梯度便是破坏临界水力梯度。整体上看, 公式 F1 与试验结果相差最大, 可能是因为试验所用土样的细颗粒含量较低且该公式忽略了土颗粒之间的摩阻力^[25]。公式 F2 及 F3 计算结果与试验结果比较接近。

2.2 管涌过程中散粒土体积变化规律分析

在相同的应力环境下, 不同干密度的累计涌砂量各有差异。以 A-9、B-9、C-9 为例, 通过砂水分离装置得到 3 种试样达到稳定渗流流量时的涌砂量分别为 200.3, 178.7, 178.4 g。如图 8 所示, 涌砂初期 3 组试样累计涌砂量增长较快, 在 100 min 的时间里 A、B、C 3 组试样的累计涌砂量高达 136.6, 93.0, 54.0 g, 涌砂速率随干密度增加而减小, 这与文献[24]结论一致。且随着时间增长, 累计涌砂量的增长速率逐渐减小且涌砂量会趋于一个稳定值, 这是由于上游水头未变, 较大细颗粒不能发生运移, 且其阻塞了下方细颗粒向上运移, 正如图 7 (c) 所示。图 9 反映了在不同涌砂量下试样体积变化情况, 可以发现 A-9 试样在相同累计涌砂量时试样体积变化量明显大于 B-9 和 C-9, 且试样 A-9 体积变化明显较 B-9 和 C-9 两组要快。对照图 5, 8 和 9 分析认为, 干密度越大, 堆积在粗颗粒骨架间的细颗粒接触越紧密, 即供细颗粒运移的渗流通道的控制直径越小, 因此在渗流作用下, 渗流流量与累计细颗粒流失量会更小, 体积变化量也相应更小^[26]。此外, 在管涌侵蚀过程中出现体积变化量突然增加的情况, 可能是因为侵蚀过程中, 一部分细颗粒发生移动但尚未流失, 导致试样内部土颗粒发生重排列进而导致试样体积发生突然变化。

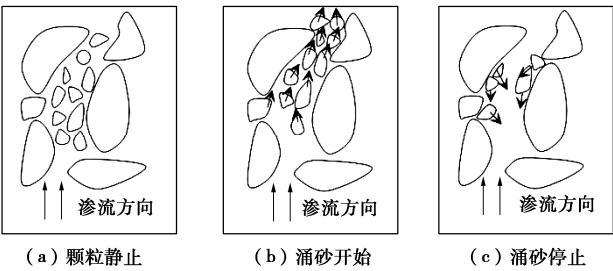


图 7 各阶段细颗粒运动情况

Fig. 7 Movement of fine particles at different stages

2.3 管涌过程中散粒土强度变化特征分析

管涌过程中细颗粒的流失以及可动细颗粒的重排列, 导致试样中形成了新的细细、粗细、粗粗接触, 这使得土骨架在一定程度上发生了变动, 这种变动必然会使土体强度发生改变^[27]。试验过程中, 当涌砂量达到预设值时保持轴压不变, 逐渐减小围压直至试样发生剪切破坏。监测得到土样在发生剪切破坏时的轴压和围压, 由此计算出土样内摩擦角的大小。

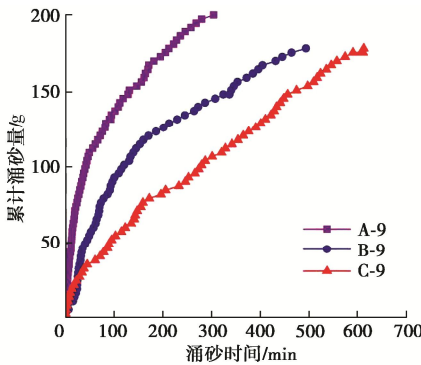


图 8 管涌过程中的涌砂量变化

Fig. 8 Variation of sand gushing during piping

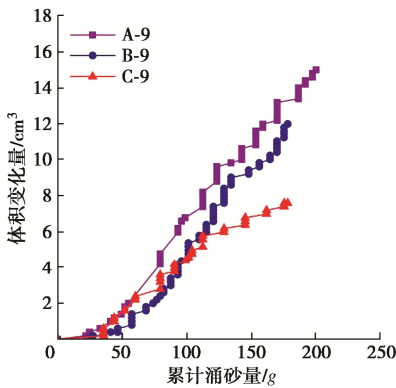


图 9 体积变化量与累计涌砂量的关系

Fig. 9 Relationship between volume change and cumulative sand gushing

通过土体抗剪强度公式^[2]计算可得到不同侵蚀率后土样内摩擦角大小, 如表 3 所示。

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2ccot\varphi} \quad (5)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为土体最大和最小主应力; c 和 φ 为土体抗剪强度的两个指标。本次试验采用的是无黏性土, 即 $c=0$ 。可认为土体内摩擦角变化情况可以直接影响土体强度的变化趋势。

图 10 给出了各组试样在不同侵蚀率下试样剪切破坏时的内摩擦角正切值。可以看出, 随着细颗粒的流失, 土体强度呈下降趋势。

为了进一步量化细颗粒流失对散粒土强度的影响, 引入强度折减系数 ΔR ^[28]:

$$\Delta R = 1 - \frac{\tan\varphi_t}{\tan\varphi_0} \quad (6)$$

式中： φ_0 为未发生细颗粒流失状态下，试样未破坏时的摩擦角，文中对应于 A-1、B-1、C-1 试验组； φ_t 为不同侵蚀率下试样破坏时的摩擦角。得到强度折减系数与侵蚀率的关系如图 11 所示。以 A-9、B-9 和 C-9 为例，在达到最大侵蚀率时，土体内摩擦角较侵蚀前分别下降了 3.54° ， 3.4° 和 3.01° ，对应强度折减系数分别为 11.92%，11.65%和 10.60%。

表 3 各组试验结果

Table 3 Test results of various groups

编号	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta R / \%$	编号	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta R / \%$	编号	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta R / \%$
A-1	53.24	0.00	B-1	54.90	0.00	C-1	56.71	0.00
A-2	52.57	2.41	B-2	54.66	0.91	C-2	57.26	-2.11
A-3	53.02	0.82	B-3	53.94	3.50	C-3	56.44	1.01
A-4	52.14	3.93	B-4	54.41	1.79	C-4	56.98	-1.04
A-5	51.29	6.80	B-5	53.94	3.50	C-5	55.92	2.96
A-6	50.68	8.80	B-6	53.47	5.13	C-6	55.15	5.70
A-7	50.48	9.45	B-7	51.92	10.31	C-7	54.18	9.04
A-8	49.90	11.32	B-8	51.71	10.99	C-8	54.41	8.24
A-9	49.70	11.92	B-9	51.50	11.65	C-9	53.70	10.60

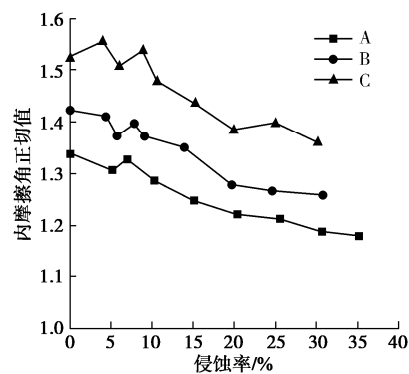


图 10 不同侵蚀率下内摩擦角正切值

Fig. 10 Tangential values of internal friction angle under different erosion rates

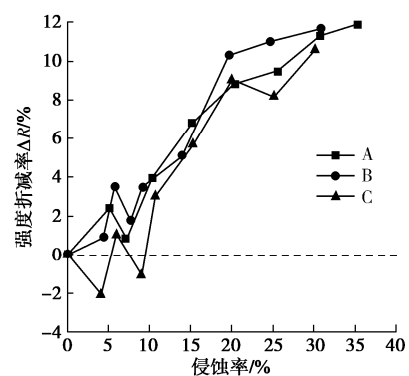


图 11 强度折减系数随侵蚀率的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of strength reduction coefficient with erosion rate

可以看出，随着细颗粒的流失，土样抗剪强度整

体上呈下降的趋势。其原因主要是细颗粒流失使得土颗粒骨架之间的空隙增加，细颗粒对骨架颗粒的支撑作用不断消失，且在水流冲刷下的颗粒间的嵌入和连锁作用产生的咬合力进一步减弱，进而在宏观上引起结构失稳即表现为土体强度降低。

此外，通过对 A、B、C 3 组试验强度折减变化规律比较可以看出，相同侵蚀率下 C 组的强度折减率稍低。考虑到 C 组试样控制干密度最大，其颗粒排列更加紧密，骨架颗粒咬合作用更强，因此在细颗粒流失过程中骨架自稳定性更加稳固。由图 9 也可以看出，试样 A-9、B-9、C-9 在管涌侵蚀后密度分别减少至 1.69，1.74，1.78 g/cm³，试样 A、B 体积变化量相差无几，相较于 A-9、B-9，C-9 内摩擦角减小的更多，这可能是因为干密度越大的试样流失的细颗粒更少，体积变化量越小，试样侵蚀后的密度更大，颗粒间咬合力降低较小，所以试样强度折减更低^[28]。

图 11 展示了各组试样不同侵蚀率条件下强度折减的变化过程，可以发现 3 组试样中有个别土样强度随侵蚀率增加而局部增加的现象，其原因可能有以下两方面：①在较小侵蚀率条件下，土体随颗粒流失产生对应的体积变化，随之产生土体骨架颗粒的重分布，同时可能出现了细颗粒阻塞，在外部荷载作用下在骨架颗粒周围的重新组合，暂时形成了相对稳定的结构。②对于同一组试验，不同侵蚀率试验各自采用一个试样。虽然同组试验采用试样的土体级配、控制密实度等皆相同，但在制样过程中难免产生离散性，使得不同试样在相同试验条件下表现出不同的结果差异。

通过以上的分析可以看出，散粒土干密度越小，则其在管涌初期的涌砂速率越大，最终细颗粒流失量越大，同时其最终体积变化量和管涌后土体强度折减系数也越大，同时发现土体强度折减系数与其体积变化量呈正相关。由此可见，在涌砂过程中可以考虑通过监测体积变化量来间接反映土体强度的折减程度，在实际工程中也可考虑利用变形监测的方法来评价管涌侵蚀的危险系数。

3 结 论

本文通过对 3 种不同干密度试样进行了室内管涌侵蚀试验，得到了间断级配散粒土在管涌侵蚀过程中的水力特性、细颗粒流失规律以及管涌侵蚀后土样强度变化特性。得到以下 3 点结论。

(1) 在相同应力环境下，间断级配散粒土发生管涌破坏的临界水力梯度与土体干密度有关。干密度越大则破坏临界水力梯度越高。利用公式 F1、F2、F3

进行试验数据对比分析,发现在该应力环境下,破坏临界水力梯度与理论计算刚开始管涌的临界水力梯度相近。

(2)在相同应力环境下,管涌初期细颗粒流失速率较快,随着管涌的进行细颗粒流失速率是逐渐减缓的。此外散粒土发生管涌侵蚀破坏时的渗流流量、累计细颗粒流失量和体积变化量均与干密度呈负相关关系。

(3)管涌侵蚀对散粒土强度的影响受干密度和侵蚀率共同的影响,随着侵蚀加剧,土体强度呈下降趋势。土体干密度越大,侵蚀后细颗粒流失量越小及体积变化量越小,土体强度折减系数越小,即土体强度折减程度越小。

本文仅研究了单一应力环境下不同密实度散粒土管涌侵蚀过程以及土体强度的变化特征,而在工程实际应用中的条件是复杂多变的,后续有待研究复杂条件下土体管涌侵蚀过程以及土体强度的变化特征。

参考文献:

- [1] 《中国水旱灾害防御公报》编写组.《中国水旱灾害防御公报 2021》概要[J].中国防汛抗旱, 2022, 32(9): 26-32. (Compilation group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China flood and drought disaster prevention bulletin 2021[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(9): 26-32. (in Chinese))
- [2] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [3] 罗玉龙, 速宝玉, 盛金昌, 等. 对管涌机理的新认识[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1895-1902. (LUO Yulong, SU Baoyu, SHENG Jinchang, et al. New understanding of piping mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1895-1902. (in Chinese))
- [4] 姚志雄, 周健, 张刚, 等. 颗粒级配对管涌发展的影响试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 200-208, 218. (YAO Zhixiong, ZHOU Jian, ZHANG Gang, et al. Experimental study of particle grading impact on piping mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 200-208, 218. (in Chinese))
- [5] 罗玉龙, 张兴杰, 张海彬, 等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3094-3106. (LUO Yulong, ZHANG Xingjie, ZHANG Haibin, et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3094-3106. (in Chinese))
- [6] 谷敬云, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于平面激光诱导荧光的潜蚀可视化试验装置及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1287-1296. (GU Jingyun, LUO Yulong, ZHANG Xingjie, et al. A suffusion visualization apparatus based on planar laser induced fluorescence and the preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1287-1296. (in Chinese))
- [7] 梁越, 张强, 曾超, 等. 变向渗流下的无黏性土颗粒起动机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 89-92, 104. (LIANG Yue, ZHANG Qiang, ZENG Chao, et al. Non-cohesive particles starting mechanism under the changing seepage direction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2016, 35(2): 89-92, 104. (in Chinese))
- [8] LIANG Y, YEH T C J, Zha Y Y, et al. Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(5): 849-860.
- [9] LIANG Y, YEH T C J, WANG J J, et al. Onset of suffusion in upward seepage under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 23(12): 1-15.
- [10] 吴梦喜, 叶发明, 张琦. 细颗粒流失对砂砾石土本构关系的影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1550-1556. (WU Mengxi, YE Faming, ZHANG Qi. Effect of fine grain loss on the stress-strain relationship of sand and gravel soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1550-1556. (in Chinese))
- [11] 钟世英, 时文浩, 王培众, 等. 不同相对密实度下砂土侵蚀破坏试验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(1): 49-55, 78. (ZHONG Shiying, SHI Wenhao, WANG Yuzhong, et al. Experimental study on erosion and destruction of sandy soil under different relative compactness[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2022, 37(1): 49-55, 78. (in Chinese))
- [12] 徐日庆, 王兴陈, 朱剑锋, 等. 初始相对密实度对砂土强度特性影响的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 345-349. (XU Riqing, WANG Xingchen, ZHU Jianfeng, et al. Experiment of initial relative density effects on sand strength[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 345-349. (in Chinese))
- [13] 詹美礼, 闫萍, 尹江珊, 等. 不同轴压下悬挂式防渗墙堤基渗透坡降试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 36-40, 46. (ZHAN Meili, YAN Ping, YIN Jiangshan, et al. Experimental study on seepage gradient of embankment

- foundations with suspended cut-off walls under different axial pressures[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, **36**(3): 36-40, 46. (in Chinese))
- [14] 詹美礼, 辛圆心, 唐健, 等. 砾石心墙土复杂应力耦合作用下的渗流特性[J]. *水利水电科技进步*, 2016, **36**(4): 36-41. (ZHAN Meili, XIN Yuanxin, TANG Jian, et al. Permeability of gravel soil for core wall under complex stress coupling effect[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, **36**(4): 36-41. (in Chinese))
- [15] 凌华, 张胜, 敖大华, 等. 复杂应力状态下土料三轴渗透试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, **45**(5): 451-456. (LING Hua, ZHANG Sheng, AO Dahua, et al. Triaxial test study on the permeability of soil under complex stress state[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, **45**(5): 451-456. (in Chinese))
- [16] AKIHIRO T, LIN K. Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2014, **37**(2): 347-364.
- [17] MAO O Y, AKIHIRO T. Influence of initial fines content on fabric of soils subjected to internal erosion[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**(2): 299-313.
- [18] 田大浪, 谢强, 宁越, 等. 间断级配砂砾土土的渗透变形试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(11): 3663-3670. (TIAN Dalang, XIE Qiang, NING Yue, et al. Experimental investigation on seepage deformation of gap-graded sand-gravel soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(11): 3663-3670. (in Chinese))
- [19] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, **22**(2): 215-225.
- [20] 土工试验规程: SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版, 1999. (Geotechnical Test Rules: SL237—1999[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999. (in Chinese))
- [21] SIRJACOBS D, SHAINBERG I, RAPP I, et al. Polyacrylamide, sediments, and interrupted flow effects on rill erosion and intake rate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(4): 1487-1495.
- [22] 毛昶熙, 段祥宝, 吴良骥. 砂砾土各级颗粒的管涌临界坡降研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(12): 3705-3709. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, WU Liangji. Study of critical gradient of piping for various grain sizes in sandy gravels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(12): 3705-3709. (in Chinese))
- [23] 毛昶熙. 堤防工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (MAO Changxi. *Dikes Engineering Manual*[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [24] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (LIU Jie. *Seepage Stability and Seepage Control of Soil*[M]. Beijing: Hydraulic Power Press, 1992. (in Chinese))
- [25] 宋新江, 钱财富. 渗流作用下黏性土水力梯度分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, **8**(5): 65-67. (SONG Xinjiang, QIAN Caifu. Analysis of hydraulic gradient of cohesive soil in water seepage[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2010, **8**(5): 65-67. (in Chinese))
- [26] 陈亮, 张哲, 陈成, 等. 不同细颗粒含量土体管涌三轴试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, **36**(2): 1-4, 37. (CHEN Liang, ZHANG Zhe, CHEN Cheng, et al. Research on piping and triaxial test in soils with different fine particle content[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, **36**(2): 1-4, 37. (in Chinese))
- [27] 李伟一, 钱建国, 尹振宇, 等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学-离散元耦合模拟[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(11): 3191-3201. (LI Wei-yi, QIAN Jianguo, YIN Zhenyu, et al. Simulation of seepage erosion in gap graded sand soil using CFD-DEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(11): 3191-3201. (in Chinese))
- [28] LIN K, AKIHIRO T. Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow[J]. *Soils and Foundations*, 2012, **52**(4): 698-711.