

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.011

变水头下管涌细颗粒迁移试验

陈亮^{1,2},滕耀宗^{1,2},蔡国栋^{1,2},尹子学^{1,2},万昱^{1,2}

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京 210098;
2.河海大学岩土工程研究所,江苏南京 210098)

摘要:为研究洪峰过境堤基发生管涌时内部细颗粒运动及迁出规律,采用变水头模拟洪水,对间断级配无黏性土进行室内管涌试验。以常水头下管涌规律作为对照组,使用彩砂追踪管涌过程中细颗粒的迁移,依据试验结果对不同细颗粒含量和不同孔隙比试样的渗透系数、细颗粒流失量等进行了分析。结果表明:变水头作用下,细颗粒在下降段存在逆流运动;细颗粒流失主要集中在下游,相同试验条件下,变水头流失的细颗粒比常水头多,迁移通道贯通范围大;细颗粒含量越大,孔隙比越小,在水头循环后最大破坏水力梯度差越大,细颗粒流失越严重。

关键词:管涌;变水头;渗透系数;细颗粒迁移;水力梯度

中图分类号:TV41 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)05-0082-07

Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head

CHEN Liang^{1,2}, TENG Yaozong^{1,2}, CAI Guodong^{1,2}, YIN Zixue^{1,2}, WAN Yu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the movement and migration of fine particles in piping of embankment foundation due to the flood transit, the sinusoidal water head was used to simulate the flood condition in the laboratory piping test of gap-graded non-cohesive soil. The piping rule under constant water head was used as the control group and the migration of fine particles during piping was tracked by the colored sand. The variation law of permeability coefficient, hydraulic gradient and the step-change of fine particle loss in samples with different content of fine particle and different pore ratio were analyzed according to the test results. The results show that under the variable water head, there is countercurrent motion in the descending section. The loss of fine particles is mainly concentrated downstream. Compared with the constant water head, variable head loses more fine particles and the migration channel runs through a larger area under the same test conditions. In addition, the larger the content of fine particles is, the smaller the pore ratio is, the larger the maximum hydraulic gradient difference is, and the more the loss of fine particles is.

Key words: piping; variable water head; permeability coefficient; fine particle migration; hydraulic gradient

管涌作为汛期堤防危害性较大的一种破坏形式,一旦形成破坏将带来巨大的财产损失^[1-2]。Ojha 等^[3-4]基于达西模型等经典理论,提出了确定临界水头的公式。随着技术的进步,各种试验模型不断更新,逐步由单层转向双层、三层以及多层堤基结构^[5-8]。

近年来,根据各水文站监测结果,我国南方地区汛期雨水多、强度大,对堤防带来了不可忽视的损害。陈栋等^[9]对 2020 年汛期各湖区堤岸险情进行分析,发现湖区发生管涌险情最为频繁,占 65.9%。洪水过境的水位变化与稳定渗流不同,属于变水头范畴,已有学者在变水头方面开展了研究。陈亮等^[10]研究了非稳定流下管涌发生和发展的规律;张嵩云等^[11]采用有限元软件 GeoStudio,通过渗流-稳定耦合模拟堤坝在洪水过程中的稳定性,为堤坝设计提供依据;倪小东等^[12-13]采用颗粒流 PFC 模拟了非稳定流下管涌的发生和发展,模拟结果与实际工程相吻合;苏永军等^[14]利用有限元结合分形理论,得到了各分维值随水头变化明显且

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510802)
作者简介: 陈亮(1976—),男,教授,博士,主要从事岩土渗流理论和测试研究。E-mail: 115095086@qq.com
引用本文: 陈亮,滕耀宗,蔡国栋,等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):82-88.
CHEN Liang, TENG Yaozong, CAI Guodong, et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 82-88.

与水位涨落成正比规律。大坝安全运行至关重要,学者们基于不同理论建立了安全预测模型。吕鹏等^[15]基于 FDA,将离散指标数据转换为连续函数,建立了大坝安全动态评价模型;谷艳昌等^[16]基于遗传算法,建立了 GA-SVM 大坝安全性态预测模型。

汛期洪水过境,水位短期内迅速上涨,洪峰后水位逐渐下降,同时洪水过境在一段时间内可能存在多次。因此为尽可能与实际工况相符,可将洪水过境的水位近似简化为正弦曲线变化形式^[17-19]。张哲等^[20]对土体在不同周期和振幅的正弦水头作用下的管涌特性规律进行了分析,但是未对细颗粒运动、迁出及渗流通道发展过程进行细观研究。为此,本文通过自下而上渗流的管涌装置,使用便于分层观察、追踪迁移的彩砂作为细颗粒,对不同细颗粒含量和不同孔隙比共 8 组试样在常水头和变水头下进行试验,探究变水头下土体内部细颗粒运动及迁出的规律。

1 间断级配无黏性土管涌试验

1.1 试验装置

试验采用自主研发的圆柱体管涌试验装置,该装置由供水系统、试验柱、数据收集系统、流失颗粒收集系统组成,如图 1 所示。供水系统由电机牵引绳子带动水箱上下移动;数据收集系统包括孔压传感器、流量计、无纸记录仪、信号转换器等;孔压传感器量程为 0 ~ 15 kPa,精度为±0.2% FS,流量计量程为 0 ~ 316 mL/s,精度为 1%;无纸记录仪对孔压与流量数据进行记录和存储,只能接收电流或电压信号,因此需使用信号转换器将流量计输出的信号转换为 4 ~ 20 mA 电流信号;收集系统中天平量程为 500 g,精度为 0.01 g。

1.2 试验材料与方案

试验材料为长江边河滩地区的砂土,采样地点位于南京市板桥汽渡。根据 Kenny 等^[21]的渗透稳定性准则,试样中粗颗粒粒径为 2 ~ 8 mm,其中 2 ~ 4 mm 占 70%,4 ~ 8 mm 占 30%;细颗粒为粒径 0.075 ~ 0.25 mm 的细砂。细砂经水洗烘干后与染色剂(德国 SINO-401 石材染色剂^[22])均匀拌合染色,染色风干后水中浸泡 48 h 未发现褪色现象。试样级配曲线及比重信息如图 2 所示,试验方案见表 1。试验组 Sin-FC 与 Sin-U-0.5 试样用于研究不同细颗粒含量(质量分数,下同)下的规律,试验组 Sin-U 用于研究不同孔隙比下的规律,Con-U 作为 Sin-U 的对照组。

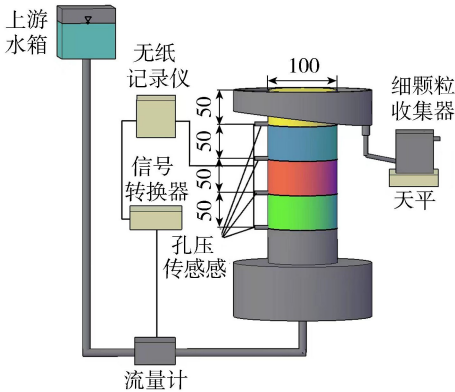


图 1 试验装置构造 (单位:mm)

Fig.1 Construction of test device (unit: mm)

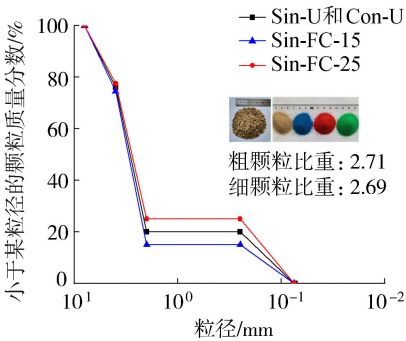


图 2 试验用料级配曲线

Fig.2 Gradation curve of test materials

1.3 试验步骤

- a. 试验开始前需对数据采集系统进行标定。采用湿拌法将粗颗粒与细颗粒充分拌匀,每层厚度为 50 mm,按照绿、红、蓝、黄颜色顺序由下至上分层击实装样。将外部水头固定,使液面和试样顶面齐平,试样饱和 24 h 以上。
- b. 从饱和时的水头高度开始,逐级提升上游水头,每级水头瞬时提升 4 cm 且维持 4 min。待顶部有红或绿色细颗粒涌出时,维持 4 min 后开始降低水头,降低速率和水头维持时间与上升段一致,当降低至试样顶

表 1 变水头试验方案

Table 1 Schemes of variable water head test			
试验组	试样编号	细颗粒含量/%	孔隙比 e
Sin-FC	Sin-FC-15	15	0.5
	Sin-FC-25	25	0.5
Sin-U	Sin-U-0.4	20	0.4
	Sin-U-0.45	20	0.45
	Sin-U-0.5	20	0.5
Con-U	Con-U-0.4	20	0.4
	Con-U-0.45	20	0.45
	Con-U-0.5	20	0.5

注:试样编号中,Sin 为变水头;Con 为常水头;FC- x 为细颗粒含量;U- x 表示孔隙比。

面不发生涌砂时,为一次循环。以上一次循环结束时的水头为起始点进行下一次的循环,水头循环共进行3次。最终使得水头变化的线形近似为正弦式,与水文站汛期水头变化相似。Con-U 试验组与 Sin-FC、Sin-U 试验组第一次循环的上升段操作相同,Con-U 组在达到峰值水头后将水头固定,直至与3次循环结束时间一致时结束试验。每级水头存在停留平台主要为了使各级水头对土体充分影响。

c. 每一级水头下,记录出砂的颜色、出砂时水头位置、出砂时间并收集涌砂,通过天平读数计算细颗粒流失量。

2 试验结果与分析

2.1 迁移过程及管涌后迁移通道分析

不同工况细颗粒迁移有相似特征,选取 Sin-U-0.4 试样观察变水头下细颗粒迁出现象。初始阶段,试样在水头升高过程中保持稳定,细颗粒为静止状态;当水头提升到细颗粒启动时,细颗粒开始跳跃,试样表面在粗颗粒之间出现细小的管涌口,管涌口随水头的提高不断增多同时向四周扩张,迁移通道逐渐贯通,最终试样顶面出现红色或绿色细颗粒,迁移通道贯通。在水头下降阶段,管涌口细颗粒流失程度减缓,孔口堆积的细砂有向通道回流的现象,管涌口产生回缩。之后的水头循环中已有的管涌口扩展,同时产生新的管涌口。因此可将一次循环中细颗粒迁出分为4个阶段:稳定阶段、细颗粒位置调整阶段、细颗粒迁出阶段、细颗粒迁出减缓阶段。

试验结束后,从顶面每隔 2.5 cm 挖取土样并拍照,如图 3 所示,结合照片和数据分析各层细颗粒迁移情况。试样顶面有 3 种颜色颗粒,且从黄、蓝到红色的细颗粒含量依次递减。2.5 cm 横截面处可明显观察到由于细颗粒大量的迁移而剩下粗颗粒骨架所形成的空洞,且空洞不止一个,即产生多条通道。中上部细颗粒迁出比下部多,从顶部到底部,迁移通道有效面积在逐渐变小,2.5 cm 横截面的迁移通道面积占截面 47.7%,5 cm 横截面的迁移通道面积占 19.9%,而中下部通道面积不足 10%。由此可认为迁移通道由下游逐渐向上游扩展且沿着渗流方向在薄弱处曲折发展,通道截面多为不规则长椭圆形。在下部横截面中存在上层颜色的细颗粒,由此说明细颗粒存在逆流运动,在 12.5 cm 和 17.5 cm 横截面处可观察到此现象。

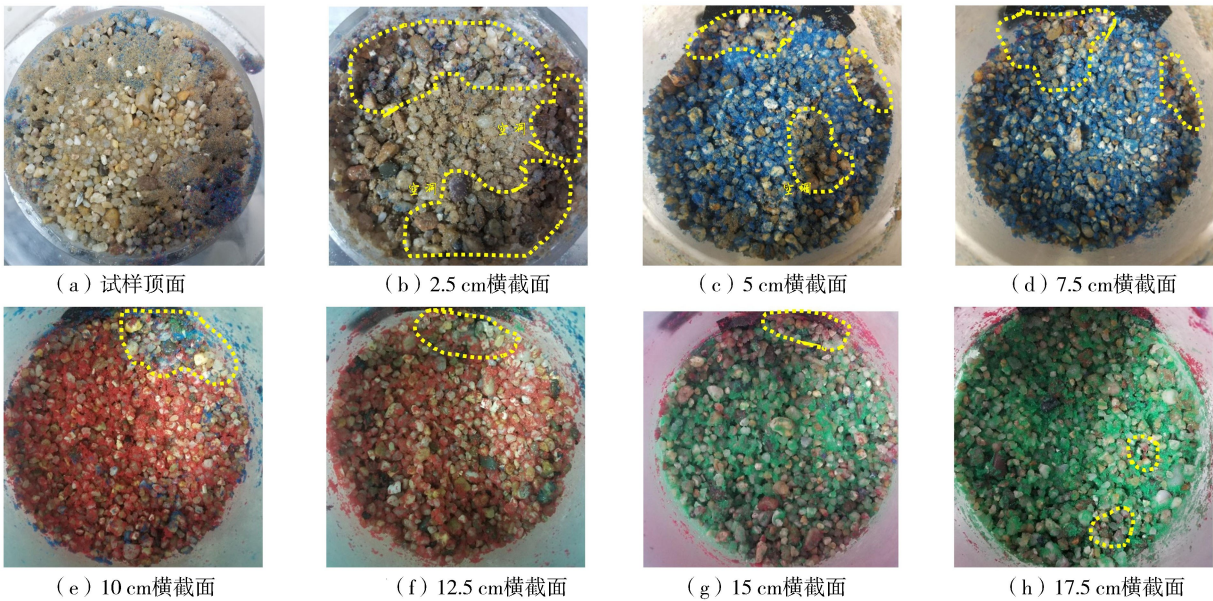


图3 Sin-U-0.4 试样顶面及横截面

Fig.3 Top surface and cross sections of Sin-U-0.4 sample

2.2 渗透系数与细颗粒运动分析

由图 4 可以看出,常水头下渗透系数随时间逐渐增大,而变水头下的渗透系数整体呈正弦上升趋势。细颗粒迁移过程中大量聚集于通道中,会引起堵塞,渗透系数降低,这种现象是随机的、短暂的,在管涌破坏中很常见,文献[23-24]中也存在此现象。在常水头和变水头上升段中,细颗粒在受到向上渗透力的作用下发生迁移从而渗透系数增大,即使向上迁移过程中偶尔会发生堵塞使得渗透系数短暂降低,但最终均会冲破堵

塞后细颗粒继续迁移,这种颗粒迁移规律在文献[25]中也存在。

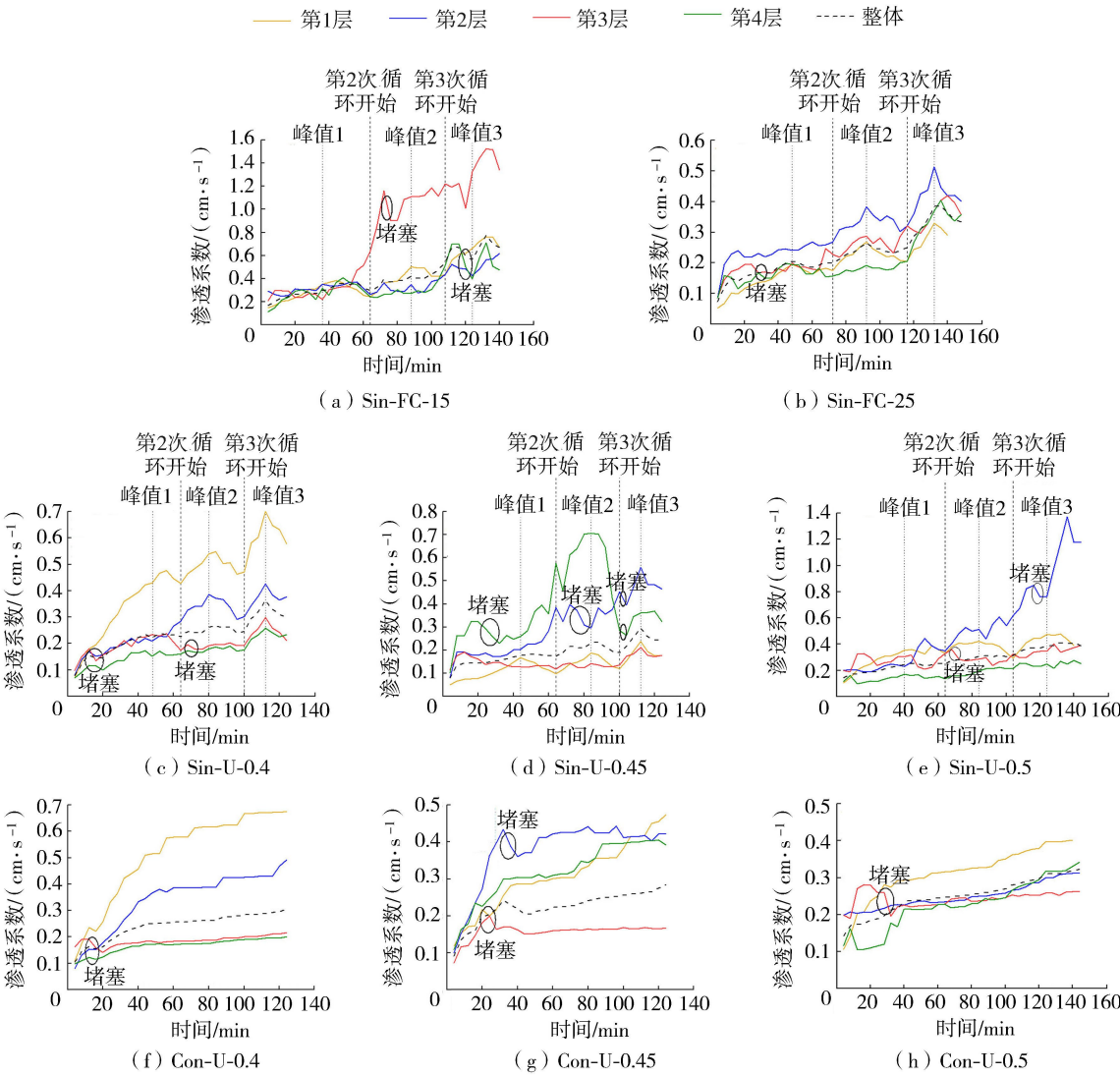


图 4 各试样渗透系数随时间变化

Fig. 4 Variation of permeability coefficient over time of each sample

由试验现象可知,水头下降阶段细颗粒不断迁出土体,使试样孔隙比增大,根据柯森-卡门渗透系数公式,渗透系数应增加,但试样整体渗透系数随着外部水头的降低出现减小或者先增加再减小的现象(图 4)。随着水头下降,水流开始无法支持通道内的全部细颗粒向上运动,所以部分细颗粒开始下落并在孔隙处聚集,与下部上涌的细颗粒一起堵塞孔隙,对下部细颗粒的迁移和水流的运动产生阻碍,因而渗透系数减小。因此细颗粒在下降段颗粒运动较紊乱,颗粒运动方向存在随机性,如图 5 所示。

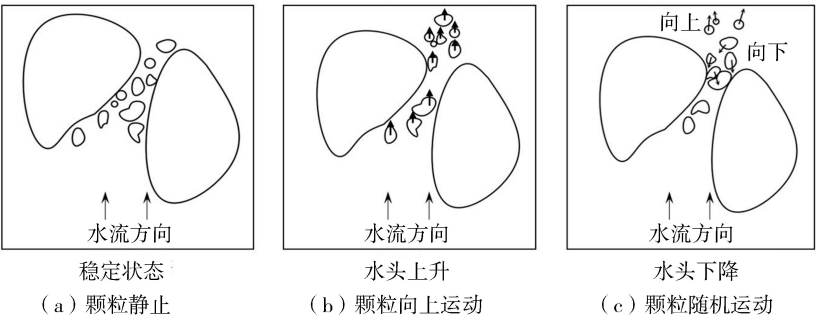


图 5 变水头各阶段细颗粒运动情况

Fig. 5 Movement of fine particles in each stage under the variable head condition

2.3 细颗粒迁出分析

由图 6 可知,累计流失量随着细颗粒含量的增加而增加,随着孔隙比的增加而减小。常水头下,累计流失量的增加逐渐变缓,最终在相同试验条件下总流失量小于变水头下的试样。常水头下,细颗粒在迁出过程中其所在位置不断发生变化,最终在恒定的水头下受力平衡保持稳定而不发生迁移。而变水头下,细颗粒累计流失量近似为直线增加,但在峰值水头两侧曲线的斜率明显上升段大于下降段,呈现略微的波动。由此说明一旦超过临界水力梯度,即使在水头下降的过程中,流失量也一直在增加,管涌依然会发生。水头下降阶段,通道中的细颗粒存在下沉现象,打破了在上升阶段具有的与常水头下类似的平衡状态,颗粒重新分布,且比试验前松散,同时上升段存在的堵塞现象会被打破,使得细颗粒在下一级循环中更容易迁出,因此累计流失量大于常水头下的流失量。

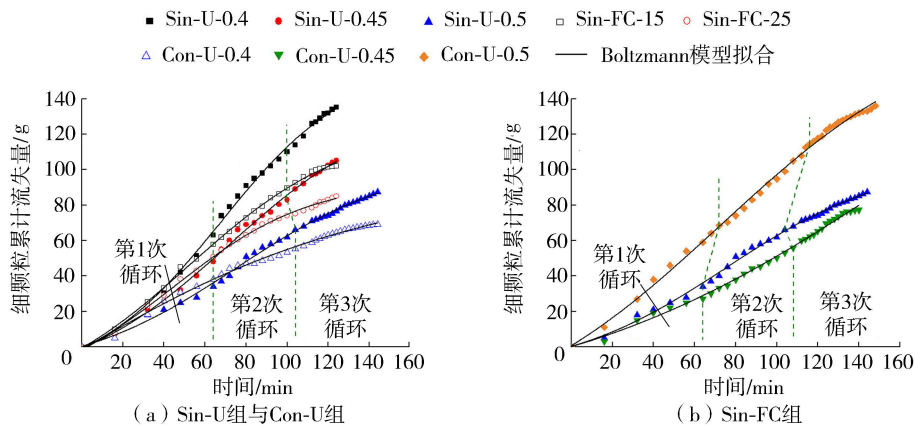


图 6 细颗粒累计流失量随时间变化

Fig. 6 Variation of cumulative fine particle loss of specimen over time

随着水头循环次数的增加,细颗粒的累计流失量增大,土体的渗透系数也逐渐增加,这和细颗粒在粗颗粒骨架内运动和迁出土体是密不可分的。采用 Boltzmann 模型对 Sin-FC、Sin-U 与 Con-U 组细颗粒累计流失量 m_s 进行拟合:

$$m_s = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(t-t_0)/A_3}} \tag{1}$$

式中: t 为时间; A_1 、 A_2 、 A_3 、 t_0 为模型参数,具体取值见表 2。

表 2 细颗粒累计流失量模型参数取值

Table 2 Parameter values of cumulative loss model of fine particles

试样编号	A_1	A_2	A_3	t_0	R^2
Sin-U-0.4	-19.229 00	160.024 76	31.386 12	67.650 41	0.997 82
Sin-U-0.45	-22.452 58	137.365 56	38.499 12	71.537 29	0.997 55
Sin-U-0.5	-15.634 38	104.900 75	39.853 60	75.331 73	0.997 32
Con-U-0.4	-32.223 34	124.670 87	38.091 69	52.535 54	0.998 75
Con-U-0.45	-25.280 25	93.685 85	33.023 97	45.125 06	0.998 53
Con-U-0.5	-152.136 91	95.789 06	83.687 85	-35.807 47	0.995 06
Sin-FC-15	-34.537 31	233.841 71	86.554 60	165.533 20	0.996 60
Sin-FC-25	-49.726 39	186.338 51	55.417 90	72.305 26	0.997 44

由拟合曲线可得,Boltzmann 模型在常水头下的拟合效果要好于变水头。变水头下,水头上升与下降段颗粒流失速率不同,存在偏离拟合曲线趋势,但随着迁移通道的不断贯通,细颗粒流失更容易,在第 3 次循环时,细颗粒累计流失量可较好地分布于拟合曲线上,因此 Boltzmann 模型在变水头下拟合细颗粒累计流失量时也较为适用。

各层流失量为各层总的流失量与其他层的补给量之差。从图 7 可以看出,各试样流失量主要集中于下游,因此由于细颗粒迁移导致的空洞也多见于下游。在相同水力梯度条件下,下游较上游迁移通道短,更容易迁出。对比 Sin-U 组与 Con-U 组各层流失量,Sin-U 组上半部分迁出量在 55% 至 65% 之间,Con-U 组上半部分迁出量为 69% 以上,而 Sin-U 组的总迁出量大于 Con-U 组,即 Sin-U 组下半部分迁出较多,Sin-FC 组中

下半部分迁出量占 40% 左右,与上半部分迁出量相当,因此可以说明变水头使得迁移通道贯通范围更大,对土体结构破坏更严重。

2.4 水力梯度变化规律分析

峰值水头为底部细颗粒迁出土体时的破坏水头,将此时水头对应的水力梯度定义为破坏水力梯度。由图 8 可知,Con-U 试验组中,在保持最高水头的过程中,水力梯度逐渐降低,但降低幅度小于变水头。第 1 次循环的破坏水力梯度随孔隙比的减小而增加,细颗粒含量为 20% 时最大。在逐次水头循环中,孔隙比越小的试样,破坏水力梯度减小幅度越大。主要由于孔隙比小的试样潜在迁移通道的部分占比较小,因而第 1 次循环需要较大的水力梯度才能发生管涌破坏,当土体迁移通道贯通后孔隙增大,底部细颗粒迁出所需要的水力梯度明显降低。细颗粒含量越大,破坏水力梯度降低的幅度越大。破坏水力梯度的降低幅度与细颗粒累计流失量和渗透系数变化紧密相关,降低幅度越大说明在之前水头循环过后流失量较大,使得渗透系数变大,细颗粒的迁移变得更为容易。各循环过程中的破坏水力梯度见表 3。由表 3 结合流失量数据可得,细颗粒累计流失量与最大破坏水力梯度差呈正相关,降低幅度大说明内部细颗粒流失较多。因此,破坏水力梯度的变化幅度可作为评判土体内部细颗粒流失程度的一个指标。

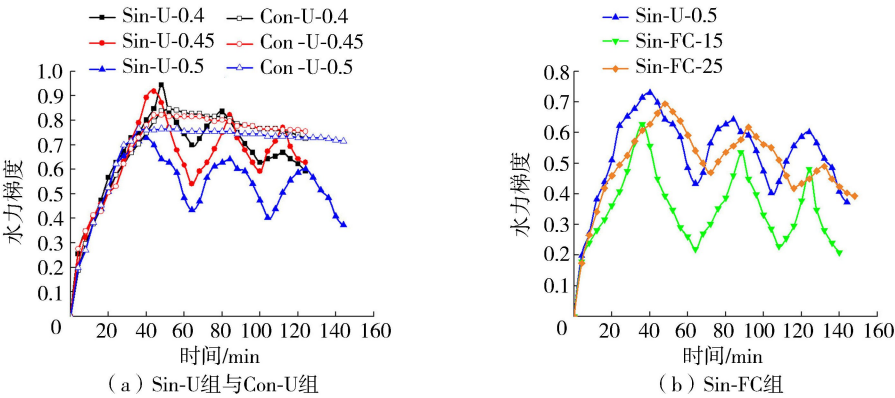


图 8 水力梯度时程曲线
Fig. 8 Time series of hydraulic gradient of specimen

3 结 论

- a. 变水头下渗透系数随时间的变化并不同于常水头下的持续增加,而是整体上呈正弦上升趋势,在迁移过程中无论水头上升还是下降均存在通道堵塞现象,下降段细颗粒存在由下游向上游逆水流运动的现象。
- b. 常水头下细颗粒累计流失量趋缓增加,而变水头近似直线增加且在水头上升和下降交界处有所波动流失主要集中在下游,通道截面有效面积从下游到上游逐渐变小,且变水头迁移通道贯通范围更大,二者使用

Boltzmann 模型进行拟合效果均较好;累计流失量与细颗粒含量呈正相关关系,与孔隙比呈负相关关系。

- c. 破坏水力梯度下降幅度可作为评判土体内部细颗粒流失程度的指标,常水头下破坏水力梯度的下降幅度明显小于变水头,反映了变水头细颗粒流失较常水头更为严重,细颗粒含量越大,孔隙比越小,破坏水力梯度下降幅度越大。

参考文献:

[1] 姚秋玲,丁留谦,刘昌军,等. 堤基管涌破坏特性研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2014,12(4):349-357.

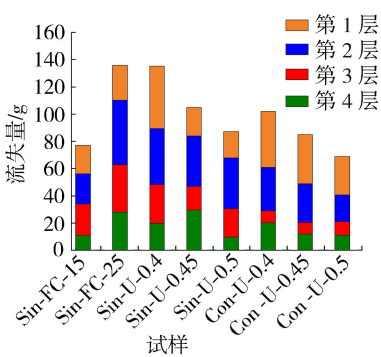


图 7 各试样总流失量与各层流失量
Fig. 7 Total loss and loss of each layer of each sample

试样编号	破坏水力梯度			最大破坏水力梯度差
	第 1 次循环	第 2 次循环	第 3 次循环	
Sin-U-0.4	0.944	0.837	0.668	0.276
Sin-U-0.45	0.918	0.821	0.770	0.148
Sin-U-0.5	0.730	0.643	0.602	0.128
Sin-FC-15	0.628	0.536	0.480	0.148
Sin-FC-25	0.694	0.617	0.490	0.204

- (YAO Qiuling, DING Liuqian, LIU Changjun, et al. Research progress on failure characteristics of embankment foundation piping [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4): 349-357. (in Chinese))
- [2] 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 understandings on piping mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1895-1902. (in Chinese))
- [3] OJHA C S P, SINGH V P, ADRIAN D D. Influence of porosity on piping models of levee failure [J]. Journal of Geo-technical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(12): 1071-1074.
- [4] SINGH V P, OJHA C S P, ADRIAN D D, et al. Role of sand boil formation in levee failure [C] //the 29th IAHR Congress Proceedings. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 226-231.
- [5] 明攀, 耿晓明, 陆俊, 等. 基于声发射监测的堤防管涌试验[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 33-38. (MING Pan, GENG Xiaoming, LU Jun, et al. Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 33-38. (in Chinese))
- [6] 梁越, 陈建生, 陈亮, 等. 双层堤基管涌发生发展的试验模拟与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 624-629. (LIANG Yue, CHEN Jiansheng, CHEN Liang et al. Laboratory tests and analysis on piping in two-stratum dike foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 624-629. (in Chinese))
- [7] 王霜, 陈建生, 周鹏. 三层堤基中细砂层厚度对管涌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2847-2854. (WANG Shuang, CHEN Jiansheng, ZHOU Peng. Effect of thickness of fine sand layer on piping development in three-stratum dike foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2847-2854. (in Chinese))
- [8] 王霜, 陈建生, 钟启明. 多层堤基结构管涌动态发展的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 39-45. (WANG Shuang, CHEN Jiansheng, ZHONG Qiming. Numerical study on dynamic development process of piping in multi-stratum dike foundations [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 39-45. (in Chinese))
- [9] 陈栋, 姚仕明, 朱勇辉, 等. 2020年汛期洞庭湖湖区典型堤岸险情分析及其处置建议[J]. 水利水电快报, 2021, 42(1): 64-72. (CHEN Dong, YAO Shiming, ZHU Yonghui, et al. Analysis of typical levee danger and suggestions for disposal in Dong-ting Lake during flood season in 2020 [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(1): 64-72. (in Chinese))
- [10] 陈亮, 雷文, 张红宇, 等. 非稳定流作用下管涌发生发展的室内试验及理论分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 655-662. (CHEN Liang, LEI Wen, ZHANG Hongyu, et al. Laboratory simulation and theoretical analysis of piping mechanism under unsteady flows [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 655-662. (in Chinese))
- [11] 张嵩云, 毛卉. 洪水过程的菲律宾 Kauswagan 电站围堤渗流及边坡稳定分析[J]. 水运工程, 2020(5): 55-60. (ZHANG Songyun, MAO Hui. Dike seepage and slope stability analysis of Philippines's Kauswagan Power Plant in flood process [J]. Port & Waterway Engineering, 2020(5): 55-60. (in Chinese))
- [12] 倪小东, 赵帅龙, 王媛. 非稳定流作用下管涌发生发展的细观数值模型试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3154-3161. (NI Xiaodong, ZHAO Shuailong, WANG Yuan. Numerical analysis of generation and evolution of piping mechanism in meso-level under unsteady flow [J]. Journal of Central South University (Natural Sciences), 2016, 47(9): 3154-3161. (in Chinese))
- [13] 陈闻潇, 石崇, 单治钢, 等. 基于 PFC-CFD 的土体管涌数值模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 60-64. (CHEN Wenxiao, SHI Chong, SHAN Zhigang, et al. Numerical simulation of soil piping based on PFC-CFD method [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(3): 60-64. (in Chinese))
- [14] 苏永军, 沙玉霞, 张建平. 水位涨落过程中海堤(土石坝)渗流分形分析[J]. 水运工程, 2018(1): 88-92. (SU Yongjun, SHA Yuxia, ZHANG Jianping. Fractal analysis of the seawall (earth rock dam) during the fluctuation of the water level [J]. Port & Waterway Engineering, 2018(1): 88-92. (in Chinese))
- [15] 吕鹏, 王晓玲, 余红玲, 等. 基于 FDA 的大坝渗流安全动态可拓评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 433-439. (LYU Peng, WANG Xiaoling, YU Hongling, et al. Dynamical and scalable evaluation model for dam seepage safety based on FDA [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 433-439. (in Chinese))
- [16] 谷艳昌, 吴云星, 黄海兵, 等. 基于遗传算法优化支持向量机的大坝安全性态预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 419-425. (GU Yanchang, WU Yunxing, HUANG Haibing, et al. Prediction model of dam safety behavior based on genetic algorithm optimized support vector machine [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 419-425. (in Chinese))
- [17] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 洪峰过程非稳定渗流管涌试验研究与理论分析[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1105-1114. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Piping experimental study and theoretical analysis of unsteady seepage flow during flood peak [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1105-1114. (in Chinese))

Chinese))

[3] 王军保,刘新荣,刘俊,等. 砂岩力学特性及其改进 Duncan-Chang 模型[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(12): 2388-2397. (WANG Junbao, LIU Xinrong, LIU Jun, et al. Mechanical properties of sandstone and an improved Duncan-Chang constitutive model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(12): 2388-2397. (in Chinese))

[4] 徐卫亚,黄威,张涛,等. 含软弱夹层的层状岩体流变力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4): 327-333. (XU Weiya,HUANG Wei,ZHANG Tao,et al. Experimental study on rheological properties of layered rock mass with soft interlayers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(4): 327-333. (in Chinese))

[5] 李浩,徐卫亚,王苏生. 致密砂岩循环加载试验及能量演化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2): 176-181. (LI Hao,XU Weiya,WANG Susheng. Cyclic loading test and energy evolution analysis of tight sandstone[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2): 176-181. (in Chinese))

[6] LIU Sili,ZHU Qizhi,SHAO Jianfu. Deformation and mechanical properties of rock: effect of hydrdomechanical coupling under unloading conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2020,79: 5517-5534.

[7] 盛金昌,高鹏,王珂,等. 渗流侵蚀作用对岩石裂隙剪切特性的影响试验[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):42-48. (SHENG Jinchang,GAO Peng,WANG Ke,et al. Experiments of seepage erosion influence on shear characteristics of rock fracture[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(2):42-48. (in Chinese))

[8] WALTON G. A new perspective on the brittle-ductile transition of rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2021,54: 5993 -6006.

[9] 朱其志. 多尺度岩石损伤力学[M]. 北京: 科学出版社,2019.

[10] SHAO Jianfu,JIA Yun,KONDO D,et al. A coupled elastoplastic damage model for semi-brittle materials and extension to unsaturated conditions[J]. Mechanics of Materials,2006,38(3): 218-232.

[11] 周维垣,孙卫军. 岩石的临界状态非关联弹塑性本构模型[J]. 岩石力学与工程学报,1990,9(1):1-10. (ZHOU Weiyuan,SUN Weijun. The non-associate critical elastoplastic constitutive model for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1990,9(1): 1-10. (in Chinese))

[12] 王者超,宗智,乔丽苹,等. 横观各向同性岩石弹塑性本构模型与参数求解方法研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(8): 1457-1465. (WANG Zhechao,ZONG Zhi,QIAO Liping,et al. Elastoplastic constitutive model and parameter determination for transversely isotropic rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(8): 1457-1465. (in Chinese))

[13] LIU Sili,CHEN Huanran,YUAN Shuangshuang,et al. Experimental investigation and micromechanical modeling of the brittle-ductile transition behaviors in low-porosity sandstone[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2020,179: 105654.

(收稿日期:2021 - 09 - 18 编辑:刘晓艳)

(上接第 88 页)

[18] 李玉荣. 长江流域重要水情报告(第2期)[R]. 武汉:长江水文情报预报中心,2021.

[19] 李玉荣. 长江流域重要水情报告(第10期)[R]. 武汉:长江水文情报预报中心,2021.

[20] 张哲,陈亮,雷崇武,等. 不同形式变水头作用下土体的管涌特性[J]. 河南科学,2019,37(7):1116-1121. (ZHANG Zhe,CHEN Liang,LEI Chongwu,et al. Piping characteristics of ungraded soil under variable water head[J]. Henan Science,2019,37(7):1116-1121. (in Chinese))

[21] KENNY T C,LAU D. Internal stability of granular filters[J]. Canadian Geotechnical Journal,1985,22:215-225.

[22] 彭宇,丁选明,肖杨,等. 基于染色标定与图像颗粒分割的钙质砂颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学,2019,40(7):2663-2672. (PENG Yu,DING Xuanming,XIAO Yang,et al. Study of particle breakage behavior of calcareous sand by dyeing tracking and particle image segmentation method[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(7):2663-2672. (in Chinese))

[23] SIBILLE L,MAROT D,SAIL Y. A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter[J]. Acta Geotechnica,2015,10(6):735-748.

[24] LE V T,MAROT D,ROCHIM A,et al. Suffusion susceptibility investigation by energy-based method and statistical analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal,2018,55(1):57-68.

[25] 蒋中明,王为,冯树荣,等. 砂砾石土渗透变形特性的应力状态相关性试验研究[J]. 水利学报,2013,44(12):1498-1505. (JIANG Zhongming,WANG Wei,FENG Shurong,et al. Experimental of study on the relevance between stress state and seepage failure of sandy-gravel soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(12):1498-1505. (in Chinese))

(收稿日期:2021 - 08 - 04 编辑:刘晓艳)