

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.008

颗粒形貌对循环水头作用下砂土潜蚀的影响

陈亮^{1,2,3}, 谢佳敏^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 西藏农牧学院土木水利电力工程技术研究中心重点实验室, 西藏 林芝 860000)

摘要: 为了研究非稳定流下不同颗粒形貌砂土的潜蚀特性, 选取了 3 种颗粒形貌的粗颗粒砂土(福建石英砂、长三角河砂、安徽风化砂), 采用纵横比、圆度、凹凸度 3 种颗粒形貌参数, 通过自行设计的不同水力加载方式的潜蚀试验仪器对不同颗粒形貌砂土的抗潜蚀性能进行了研究。试验结果表明: 在不同水头条件下, 试样的抗侵蚀系数与孔隙比、颗粒形貌参数均呈负相关关系; 试样孔隙比越大, 密实度越低, 抗潜蚀能力越低; 粗颗粒形貌越接近标准球形, 试样的抗潜蚀能力越低; 在试样孔隙比、粗颗粒砂土形貌、级配相同的情况下, 常水头条件下的试样抗侵蚀系数大于循环水头, 即循环水头条件会减小试样的抗侵蚀系数, 从而更易发生潜蚀。

关键词: 潜蚀; 颗粒形貌; 循环水头; 能量法; 抗侵蚀性

中图分类号: TV223

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)03-0059-08

Effect of particle morphology on subsurface erosion of sand under cyclic water head

CHEN Liang^{1,2,3}, XIE Jiamin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Key Laboratory of Civil Engineering, Water Conservancy and Electric Power Engineering Technology Research Center, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: To explore the subsurface erosion characteristics of sand with varying particle morphologies under unsteady flow conditions, three types of coarse-grained sand with distinct particle morphologies, namely quartz sand from Fujian Province, river sand from the Yangtze River Delta, and weathered sand from Anhui Province, were selected for investigation. Three key particle morphology parameters were utilized, including aspect ratio, roundness, and roughness. An independently designed apparatus capable of applying diverse hydraulic loading methods for subsurface erosion tests was employed to assess the anti-subsurface erosion performance of sand with different particle morphologies. The results demonstrate that under various water head conditions, the anti-erosion coefficient of the samples is negatively correlated with both the void ratio and the particle morphology parameters. Specifically, as the void ratio increases, the sample's density decreases, thereby reducing its anti-subsurface erosion performance. Moreover, as the morphology of the coarse-grained sand is closer to a standard sphere, the anti-subsurface erosion performance of the samples gets lower. Under identical void ratio, coarse-grained sand morphology, and gradation, the anti-erosion coefficient under the constant water head condition is greater than that under the cyclic water head condition. In other words, the anti-erosion coefficient of the samples will be reduced under the cyclic water head condition, and subsurface erosion is more likely to occur under the cyclic water head condition.

Key words: subsurface erosion; particle morphology; cyclic water head; energy method; anti-erosion performance

目前关于砂土潜蚀的研究主要是稳定流下的堤坝与堤基渗流中的潜蚀, 是通过大量室内试验、数值模拟等方法, 研究土体渗透稳定性、临界水力梯度等, 并取得了诸多成果: 陈亮等^[1]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; 凌华等^[2]通过不同级配土料的三轴渗透试验发现, 对于不同级配、密实度相同的试样, 应力水平对渗透系数的影响程度基本一致; 贺林林等^[3]通过研究不同砂土颗粒排列角度对

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243244); 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202301ZR0033G)

作者简介: 陈亮(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土渗流理论与测试研究。E-mail: Chenliang@hhu.edu.cn

通信作者: 谢佳敏(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土渗流研究。E-mail: xjm9911@163.com

引用本文: 陈亮, 谢佳敏. 颗粒形貌对循环水头作用下砂土潜蚀的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 59-66.

CHEN Liang, XIE Jiamin. Effect of particle morphology on subsurface erosion of sand under cyclic water head[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 59-66.

砂土剪切特性的影响,发现随着砂土颗粒排列角度的增大,砂土抗剪强度衰减率略有增大;梁越等^[4]研究了3种不同大小骨架颗粒对管涌规律的影响。现阶段,对不同颗粒形貌砂土在循环水头下的潜蚀特性研究还较少。在海浪、台风、潮汐等循环水头作用下,堤坝工程承受的渗流是非稳定的,土体内细颗粒的迁移规律相比稳定流下更加复杂^[5]。研究不同颗粒形貌砂土在循环水头下的潜蚀特性,对预防汛期沿海堤坝潜蚀破坏、保护群众财产安全具有重要意义。

堤坝工程的大部分问题都是由结构内部潜蚀^[6]引起的,因此对水工结构的渗流监测有4点主要要求:潜蚀发生可能性评估^[7-8]、潜在薄弱区域在结构内的定位^[7]、渗流过程的发生和发展^[9-11]、溢流的机械后果^[12-15]。目前学者们基于颗粒尺寸分布^[16-18]或收缩尺寸分布^[19]已提出几种评估潜蚀可能性的几何方法,尽管这些方法比较保守,有时还会相互矛盾,但在实践中,这些方法已被证明是有用的首选筛查工具。

为了更全面地评价各颗粒形貌砂土潜蚀发生的难易程度,本文选用长三角河砂、安徽风化砂、福建石英砂3种颗粒形貌区别明显的粗颗粒砂土,引入能量法计算砂土的抗侵蚀系数,耦合颗粒形貌参数与试样密度或孔隙比,拟合各水头条件下砂土抗侵蚀系数的经验公式,以期判断不同颗粒形貌砂土发生潜蚀的难易程度提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料及方案

为研究循环水头作用下颗粒形貌对粗颗粒砂潜蚀特性的影响,采用 ImageJ 图像处理软件对码放整齐颗粒的数字图像进行二进制转化,得到每个单元体的几何参数^[20],采用纵横比(r)、圆度(R)、凹凸度(α)3种颗粒形貌参数分别反映颗粒的伸长属性、面形状属性、边缘凹凸属性:

$$r = B/L \quad R = 4A/\pi L^2 \quad \alpha = \pi D/P$$

(1)

式中: B 为最小 Feret 直径,表示颗粒边界上最小外切平行线间距; L 为最大 Feret 直径,表示颗粒边界上最大外切平行线间距; A 为颗粒边界范围内所有像素之和按照比例尺换算的值; D 为等效直径,表示与颗粒具有相同面积的圆直径; P 为颗粒边界上连续像素的距离之和按照比例尺换算的值。

r 越接近1颗粒的长宽越相近, R 越接近1颗粒形态越接近标准圆形, α 越接近1颗粒边缘越接近标准圆形。3种粗颗粒砂的颗粒形貌参数见表1。

循环水头条件下,水力荷载变化包括各阶段水头的高度、提升周期和提升方式。在水头提升周期中,水头高度分为5个阶段,从设计最低水头高度开始,经过一阶段、二阶段两个水头高度,抬升至三阶段水头高度(一个水头循环周期的最高点),再经过四阶段、五阶段的水头降低,最后降至设计最低水头高度,一个水头循环周期结束。为了研究循环水头周期变化对潜蚀特性的影响,设置了30、60 min 两种水头提升周期。为了研究常见的正弦式水头变化与类山洪的振荡提升式的水头变化对于粗颗粒砂潜蚀特性的影响,设置了阶梯提升、振荡提升两种水头提升方式。将石英砂、河砂、风化砂分为不同潜蚀试验组,具体试验编号见表2。以孔隙比为0.40的石英砂为例,绘制其水头高度随时间变化的折线(图1)。

1.2 试验仪器

仪器主要包括一维潜蚀试验槽、智能水头控制装置、细颗粒收集装置与数据收集装置(图2)。智能水头控制装置包括电机、水箱、CL-01A 智能控制系统,控制系统控制电机带动水箱,实现循环水头条件。细颗粒收集系统由钢架、拉力传感器、细颗粒收集槽和水箱组合而成,主要用

表 1 粗颗粒砂的颗粒形貌参数

Table 1 Particle morphology parameters for coarse-grained sand

粗颗粒砂	粒径/mm	r	R	α
石英砂	2.0~8.0	0.727 1	0.669 4	0.933 9
河砂	2.0~8.0	0.724 0	0.667 3	0.894 9
风化砂	2.0~8.0	0.658 9	0.582 8	0.875 8

表 2 潜蚀试验组设置

Table 2 Group setup in subsurface erosion test

试验编号	孔隙比	试验编号	孔隙比
SY-40-c	0.40	SY-55-30j	0.55
SY-475-c	0.475	SY-55-60j	0.55
SY-55-c	0.55	SY-55-60z	0.55
HS-40-c	0.40	HS-55-30j	0.55
HS-475-c	0.475	HS-55-60j	0.55
HS-55-c	0.55	HS-55-60z	0.55
FH-55-c	0.55	FH-55-30j	0.55
FH-60-c	0.60	FH-55-60j	0.55
FH-65-c	0.65	FH-55-60z	0.55
SY-40-30j	0.40	SY-55-30j	0.55
SY-40-60j	0.40	SY-55-60j	0.55
SY-40-60z	0.40	SY-55-60z	0.55

注:SY 代表石英砂,HS 代表河砂,FH 代表风化砂,试验编号中间数值为孔隙比数值的100倍;c代表常水头,30j、60j分别代表以30、60 min为周期的阶梯水头提升,60z代表以60 min为周期的振荡水头提升。

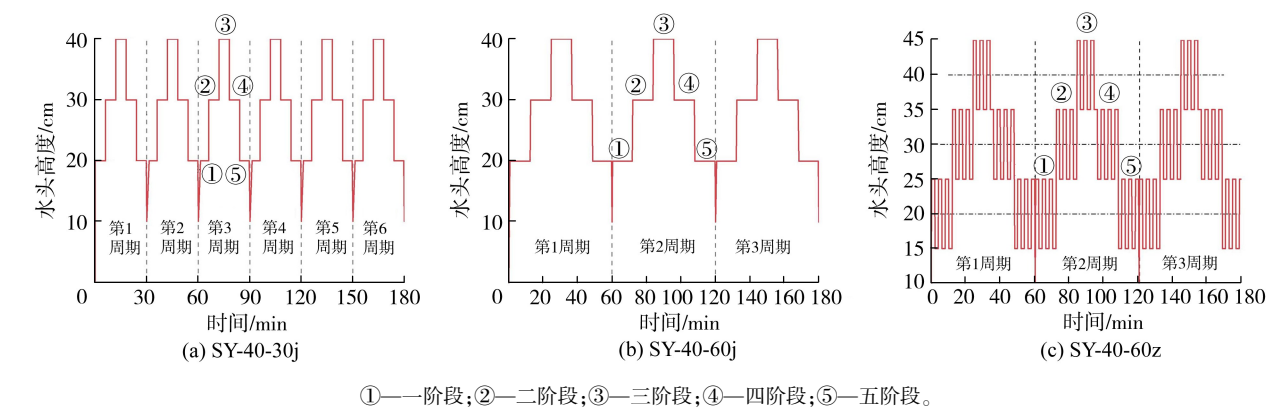


图 1 水头高度随时间变化折线图

Fig.1 Line graph illustrating variation of water head height with time

于收集、称重溢流出的细颗粒。数据收集系统包括孔隙水压力传感器、无纸记录仪等。

1.3 试验步骤

采用湿样法制样后对试样进行 24 h 饱和。开始试验时,对于常水头下的稳定渗流作用下的试样,从试样饱和时的外部水头高度开始,分级提高水头高度,观察水头提升过程中的潜蚀现象,记录开始涌砂的水头高度。当发现顶面开始大量涌出底部砂时,视试样发生了潜蚀破坏,将水头固定在当前水头,并记录试验现象。对于循环水头作用下的试验,按照不同的水头提升方案编写控制程序,使智能水头控制系统自动控制水头的循环变化。试验人员需要在试验过程中时刻观察试样顶面的涌砂情况,并记录试验现象。

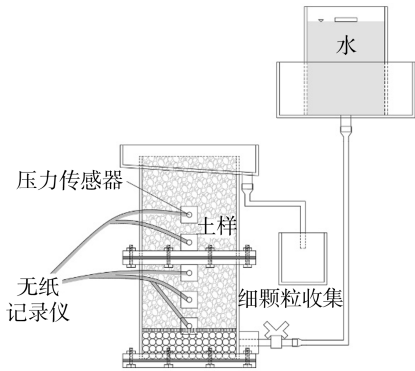


图 2 试验仪器示意图
Fig.2 Test apparatus

2 试验结果与分析

以孔隙比为 0.55 的试样研究颗粒形貌参数对潜蚀的影响。由图 3 可知,循环水头条件下,整体上破坏水力梯度从大较小排列为风化砂、河砂、石英砂,说明颗粒形貌越接近标准球形,破坏水力梯度越小,即在相同级配下越容易发生潜蚀破坏。图 4 为循环水头作用下不同颗粒形貌试验组的流量(Q)与水力梯度(i)的线性拟合斜率(k)随颗粒形貌参数变化。由图 4 可知, r 、 R 、 α 越大, k 越大,说明 r 、 R 、 α 越大,渗透性越好。

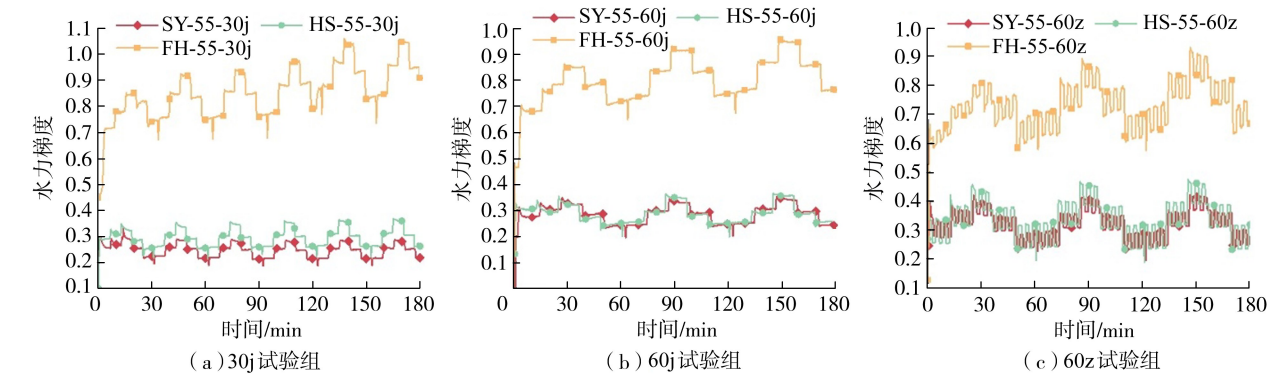


图 3 循环水头作用下各粗颗粒砂水力梯度随时间变化

Fig.3 Variation of hydraulic gradient of coarse-grained sand with time under cyclic water head condition

由图 5 可知,孔隙比相同的情况下,总溢出细颗粒质量由高到低排序为石英砂、河砂、风化砂,其中石英砂与河砂的总溢出细颗粒质量接近,远高于风化砂。由图 6 可知,当颗粒形貌参数一致时,循环水头条件 30j 与 60z 的总溢出细颗粒质量均显著高于 60j 工况。在颗粒形貌参数存在差异的条件下,30j 与 60z 两种水力条件的

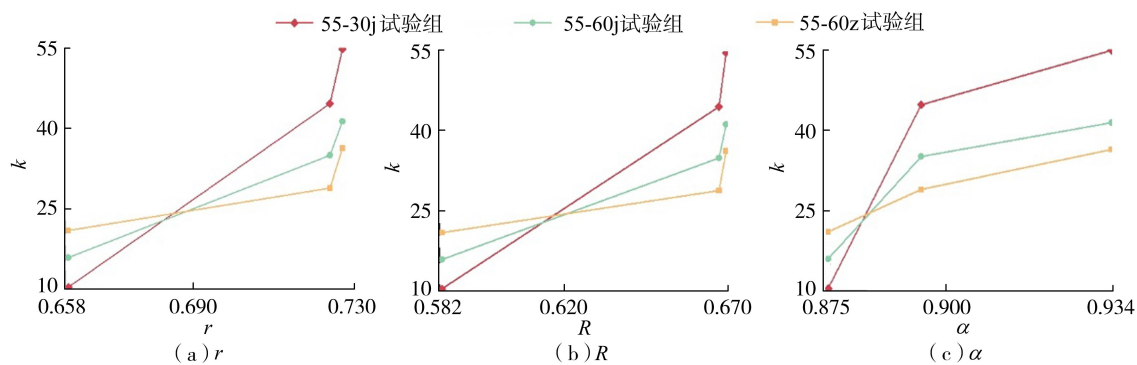


图 4 循环水头作用下 k 随颗粒形貌参数变化

Fig. 4 Variation of k with particle morphology parameters under cyclic water head condition

总溢出细颗粒质量分布未呈现显著关联性。潜蚀发生阶段溢出细颗粒质量占总溢出细颗粒质量的 50% 以上, 发展阶段结束溢出细颗粒质量占总溢出质量的 90% 以上(表 3)。

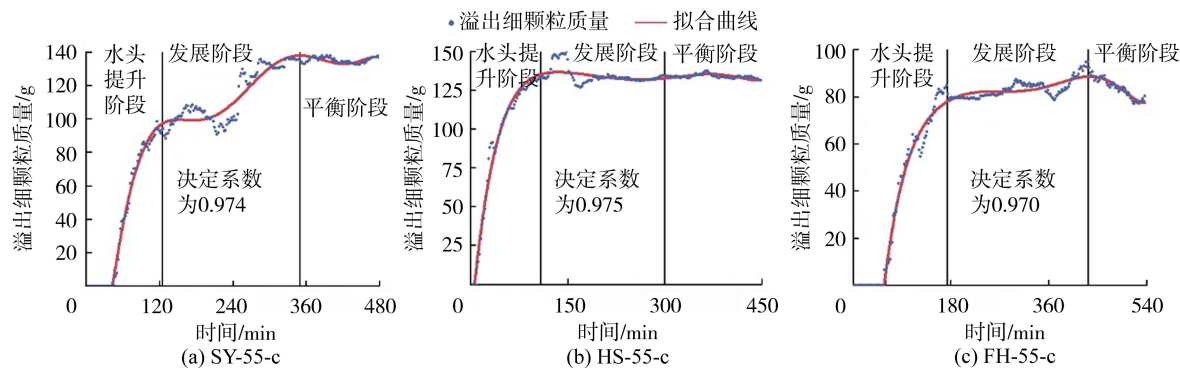


图 5 常水头条件下溢出细颗粒质量随时间的变化

Fig. 5 Variation of mass of spilled fine particles with time under constant water head condition

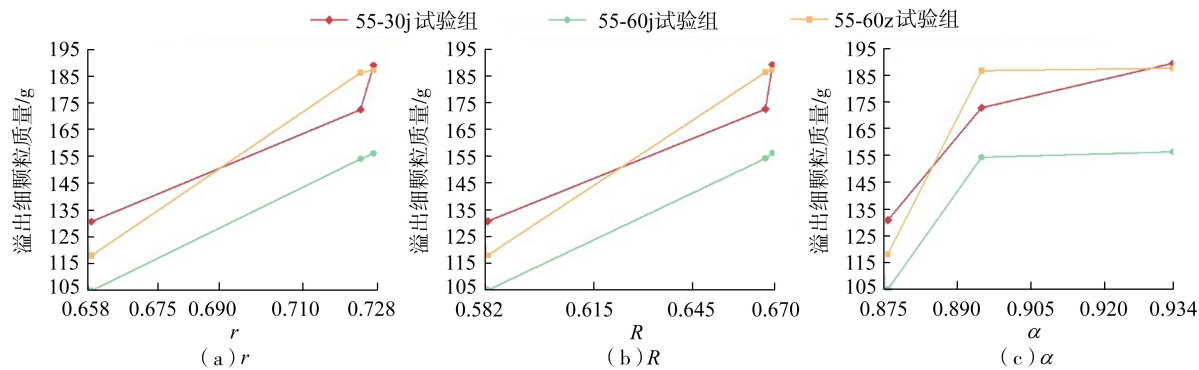


图 6 循环水头作用下溢出细颗粒质量随颗粒形貌参数变化

Fig. 6 Variation of mass of spilled fine particles with particle morphology parameters under cyclic water head condition

相同循环水头条件下,溢出细颗粒质量按照从大到小排列:石英砂、河砂、风化砂。石英砂、河砂的溢出细颗粒质量相近,远大于风化砂。在循环水头作用下,潜蚀破坏溢出的细颗粒质量与纵横比和圆度呈线性变化,与凹凸度呈非线性变化,随着颗粒形貌参数的增大,即颗粒形貌越接近标准球形,潜蚀破坏后溢出的细颗粒质量越高,发生潜蚀破坏的难度越低。

3 抗侵蚀系数分析

为了整体描述潜蚀现象,需要将试样的外部水力条件和内部土体变化联系起来。Scholtes 等^[12]提出了基于功率的本构关系,从抗侵蚀指标这一材料特性出发,提出了基于能量的本构关系。Gelet 等^[21]提出了一种基于能量法描述渗流发展的方法,该方法将土体累积溢出质量与水力流动消耗的累积能量相联系。

土细颗粒的潜蚀过程主要包括细颗粒的迁移、堵塞,此过程中能量的消耗既要考虑外部的水力荷载,即外

部水力梯度,又要考虑土体内部的水力变化,即水力流量,因此水力功率为

$$P_{\text{flow}} = \gamma_w Q \Delta h \tag{2}$$

式中: P_{flow} 为水力功率; Δh 为上下游水头差; γ_w 为水的容重。

式(2)由流体能量守恒公式推导而来,其基本假设为:
①能量耗散形式为固体颗粒附近的黏性剪切;②流体温度恒定;③系统绝热;④流体为稳态层流。在满足上述假设的情况下,水流消耗的能量随时间累积,因此定义 $E_{\text{cum},t}$ 为 t 时刻累积的水流消耗能量,即水力功率 P_{flow} 在时间上的积分。设 t 时刻的累积侵蚀质量为 $m_{\text{cum},t}$,则实时抗侵蚀系数(I_{cum})为

$$I_{\text{cum}} = -\ln(m_{\text{cum},t}/aE_{\text{cum},t}) \tag{3}$$

式中 a 为系数。

能量法考虑的是整个渗流过程,该方法假定渗流过程最后会达到稳定状态,即完全侵蚀状态。本文试验认为试验进入平衡阶段就达到了稳定状态,即溢出细颗粒质量不再增加或长时间只增加少量。在完全侵蚀状态,记最大累积侵蚀质量为 m_{max} ,最大累积消耗能量为 E_{max} ,记此时刻的 I_{cum} 为抗侵蚀系数(I_a)(式(4)),代表渗透敏感性。为使各水力条件下 I_a 均为正值,式(4)中 a 取 5。

$$I_a = -\ln(m_{\text{max}}/aE_{\text{max}}) \tag{4}$$

3.1 常水头条件下的抗侵蚀系数

根据孔压传感器数据换算可得潜蚀过程中每时刻的外部水头,根据流量计可得潜蚀过程中每时刻的流量,代入式(2)可得每 5 min 的水力功率 P_{flow} 。根据 P_{flow} 数值,可得每 5 min 的实时抗侵蚀系数。由图 7 可知,随着孔隙比的增大,实时抗侵蚀系数随之减小,说明在能量法的视角下,试样的孔隙比越大,密实度越低,其抗侵蚀能力越低,越容易发生潜蚀渗透。

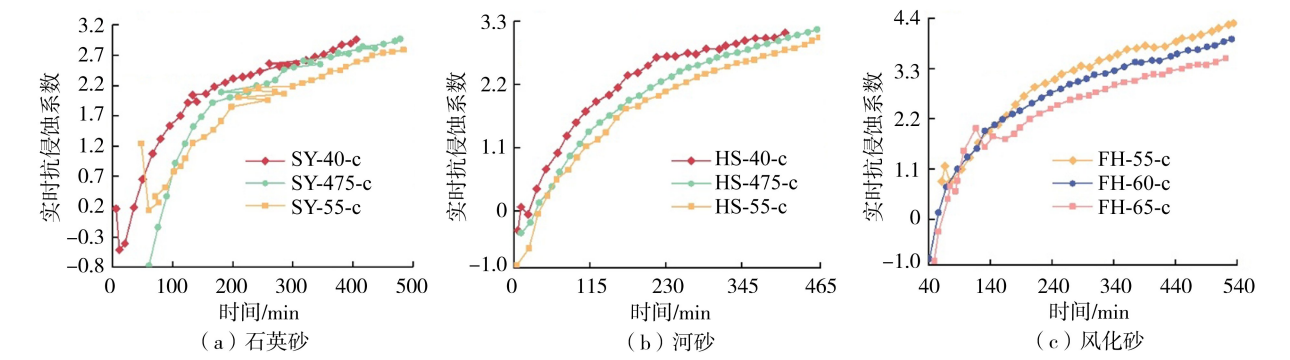


图 7 常水头条件下实时抗侵蚀系数随时间的变化

Fig. 7 Variation of real-time anti-erosion coefficient with time under constant water head condition

由表 4、图 8 可知,抗侵蚀系数随孔隙比呈线性变化,随着孔隙比增大、密实度下降,抗侵蚀系数也随之减小;随着颗粒形貌参数的增大,抗侵蚀系数逐渐减小。纵横比、圆度与抗侵蚀系数呈现线性关系,说明在常水头条件下,在孔隙比及级配恒定时,纵横比和圆度越大,颗粒越趋近于标准圆形,抗侵蚀系数越小。

表 4 常水头条件下粗颗粒砂的抗侵蚀系数

Table 4 Anti-erosion coefficients of coarse-grained sand under constant water head condition

试验编号	抗侵蚀系数	试验编号	抗侵蚀系数	试验编号	抗侵蚀系数
SY-40-c	2.464 3	HS-40-c	2.563 3	FH-55-c	3.838 7
SY-475-c	2.636 1	HS-475-c	2.412 1	FH-60-c	3.547 0
SY-55-c	2.198 5	HS-55-c	2.236 4	FH-65-c	3.194 2

抗侵蚀系数与孔隙比、纵横比、圆度均呈明显的线性关系(图 8),故假设常水头条件下的抗侵蚀系数的经验公式为

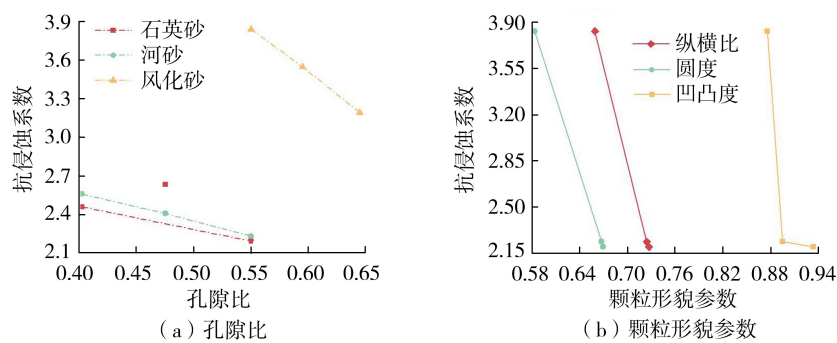


图8 抗侵蚀系数随孔隙比、颗粒形貌参数的变化

Fig. 8 Variation of anti-erosion coefficient with void ratio and particle morphology parameters

$$I_a = ke + b \tag{5}$$

其中

$$k = k_1S + b_1 \quad b = k_2S + b_2$$

式中: S 为粗颗粒形貌参数,可以为 r 、 R 、 α ; k_1 、 k_2 和 b_1 、 b_2 分别为系数 k 和 b 的斜率和截距。

由图 8(a) 中的线性拟合得到 k 与 b (表 5)。基于拟合参数 k 、 b , 分别采用各颗粒形貌参数二次线性拟合得到 k_1 、 k_2 和 b_1 、 b_2 (表 6)。由表 6 可知, r 的线性拟合效果最好, 故可将常水头条件下的抗侵蚀系数的经验公式变形为

$$I_a = k_1re + b_1e + k_2r + b_2 = 67.155re - 50.698e - 61.365r + 47.829 \tag{6}$$

计算抗侵蚀系数试验值与拟合计算值间的绝对误差与相对误差, 常水头条件下各试验的绝对误差均小于 0.05, 相对误差均小于 1%, 证明了常水头条件下的抗侵蚀系数经验公式拟合良好。

3.2 循环水头作用下的抗侵蚀系数

由图 9 可知, 循环水头条件下, 实时抗侵蚀系数随时间呈现了明显周期变化, 随着循环周期的变化波浪式上升, 主要是由于随着外部水头循环变化, 流量计和孔压传感器数据也呈现循环变化, 从而导致水力功率也循环周期变化, 致使实时抗侵蚀系数的波浪式上升。对于同一种砂, 不同的水头提升条件对实时抗侵蚀系数没有明显的影响。

表 5 常水头下抗侵蚀系数随孔隙比变化的拟合参数

Table 5 Fitting parameters of anti-erosion coefficient varying with void ratio under constant water head condition

粗颗粒砂	k	b	决定系数
石英砂	-1.772	3.173	0.999
河砂	-2.180	3.439	0.998
风化砂	-6.445	7.394	0.997

表 6 常水头下抗侵蚀系数经验公式参数

Table 6 Empirical formula parameters for anti-erosion coefficient under constant water head condition

颗粒形貌参数	k_1	b_1	R_1^2	k_2	b_2	R_2^2
r	67.155	-50.698	0.999	-61.365	47.829	0.999
R	52.302	-36.930	0.993	-47.812	35.261	0.998
α	70.106	-66.668	0.643	-62.933	61.405	0.622

注: R_1^2 、 R_2^2 分别为拟合公式 $k=k_1S+b_1$ 、 $b=k_2S+b_2$ 的决定系数。

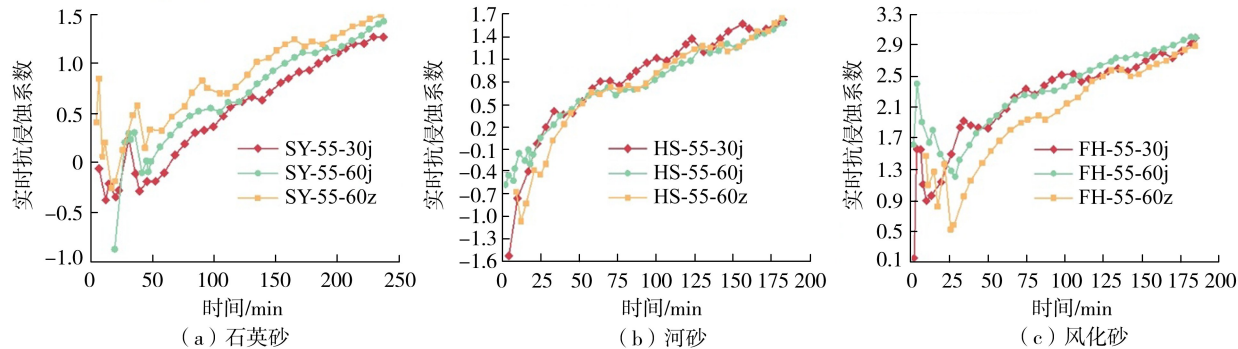


图9 循环水头作用下实时抗侵蚀系数随时间变化

Fig. 9 Variation of real-time anti-erosion coefficient with time under cyclic water head condition

由式(2)~(4)计算的循环水头条件下孔隙比均为 0.55 试验组的抗侵蚀系数见表 7。由图 10 可知, 在循环水头条件下, 试样的抗侵蚀系数随颗粒形貌参数变化规律与常水头条件下大致相同。而循环水头条件对抗侵蚀系数的影响没有明显规律, 说明循环水头条件对抗侵蚀系数的影响较小。整体上随着颗粒形貌参数的增大, 即颗粒形貌越接近标准球形, 抗侵蚀系数越小, 越易发生潜蚀。

表 7 循环水头作用下粗颗粒砂的抗侵蚀系数

Table 7 Anti-erosion coefficients of coarse-grained sand under cyclic water head condition

试验编号	抗侵蚀系数	试验编号	抗侵蚀系数	试验编号	抗侵蚀系数
SY-55-30j	0.889	HS-55-30j	1.585	FH-55-30j	2.745
SY-55-60j	1.109	HS-55-60j	1.017	FH-55-60j	2.802
SY-55-60z	1.212	HS-55-60z	1.436	FH-55-60z	2.652

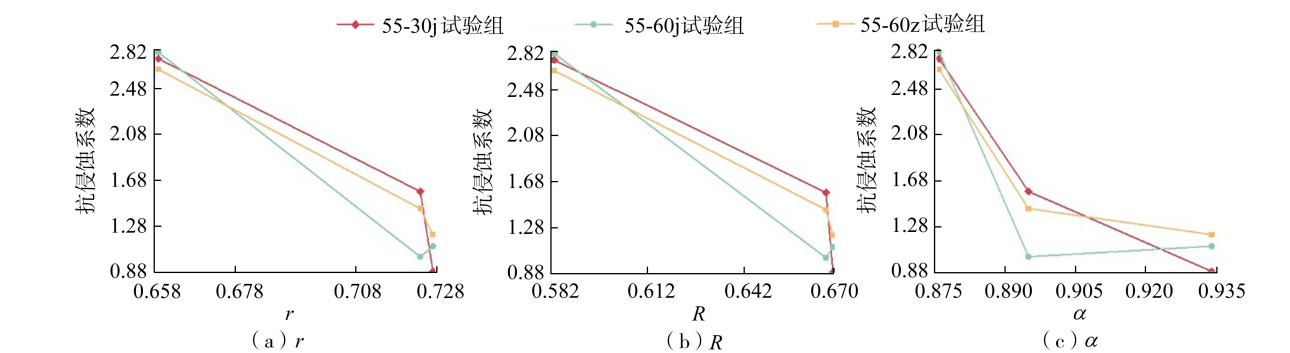


图 10 抗侵蚀系数随颗粒形貌参数的变化

Fig. 10 Variation of anti-erosion coefficient with particle morphology parameters

循环水头条件对抗侵蚀系数影响小,假设存在循环水头参数 c ,使得常水头条件下的抗侵蚀系数乘上 c ,得到 I_{av} 拟合公式:

$$I_{av} = c(k_1re + b_1e + k_2r + b_2)$$

(7)

由常水头、循环水头下的抗侵蚀系数得各试验组的 $c(c=I_{av}/I_a, I_a$ 由式(6)计算, I_{av} 由式(7)计算),结果见表 8。

由表 8 可知,不同水头提升条件对 c 影响较小,且相同的颗粒形貌参数试验组的 c 都较为相近。而不同颗粒形貌参数试验组的 c 存在明显线性规律(石英砂、河砂、风化砂的 c 平均值分别为 0.509、0.511、0.704),故做 c 对颗粒形貌参数的线性拟合($c=k_sS+b_s$),得到各拟合参数(表 9)。

r 、 R 均拟合良好,取 r 作为参数,在本文级配条件和试验槽条件下, I_{av} 为

$$I_{av} = c(k_1re + b_1e + k_2r + b_2) = (2.622 - 2.910r) \\ (67.155re - 50.698e - 61.365r + 47.829) \quad (8)$$

c 可理解为循环水头情况下试样的抗侵蚀能力相较于常水头情况的折减系数。常水头条件下, $c=1$; 循环水头条件下, $c=2.622-2.910r$ 。 r 越小,即试样的粗颗粒形貌越扁长, c 越大,即试样在循环水头条件下抗侵蚀能力的削弱程度越小,反之亦然。

4 结 论

- a. 相同水头条件下,试样孔隙比越小,破坏水力梯度越大,总溢出细颗粒质量越小。循环水头条件下,在阶段水头高度相同的情况下,循环周期为 30 min 试验组的破坏水力梯度高于 60 min 的破坏水力梯度,水头提升为振荡提升试验组的破坏水力梯度高于阶梯提升。
- b. 相同水力条件下,整体上的破坏水力梯度从大到小为:风化砂、河砂、石英砂,说明颗粒形貌越接近标准球形,其破坏水力梯度越小,在相同级配下越容易发生潜蚀破坏。
- c. 在各水头条件下,试样的抗侵蚀系数与孔隙比呈负相关关系,与颗粒形貌参数也呈负相关关系,说明试样的孔隙比越大、粗颗粒形貌越接近标准球形,抗潜蚀能力越低。在试样孔隙比、粗颗粒形貌、级配相同的情况

表 8 各试验组的 I_{av} 与 c

Table 8 I_{av} and c of each test group

试验编号	I_{av}	c	试验编号	I_{av}	c
SY-40-30j	1.192	0.484	HS-55-30j	1.585	0.702
SY-55-30j	0.889	0.407	HS-55-60j	1.017	0.450
SY-40-60j	1.108	0.450	HS-55-60z	1.436	0.636
SY-55-60j	1.109	0.508	FH-55-30j	2.745	0.713
SY-40-60z	1.349	0.548	FH-55-60j	2.802	0.728
SY-55-60z	1.212	0.555	FH-55-60z	2.652	0.689

表 9 c 随颗粒形貌参数变化的线性拟合参数

Table 9 Linear fitting parameters of c changing with particle morphology parameters

颗粒形貌参数	k_s	b_s	决定系数
r	-2.910	2.622	0.999
R	-2.270	2.027	0.999
α	-2.873	3.165	0.575

下,常水头条件下的抗侵蚀系数大于循环水头条件下的抗侵蚀系数,说明循环水头条件会降低试样的抗侵蚀系数,试样在循环水头条件下更易发生潜蚀。

d. 拟合的抗侵蚀系数经验公式表明,孔隙比越大,抗侵蚀系数越小,纵横比越大,抗侵蚀系数越小。

参考文献:

[1] 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. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 贺林林,冯楚杰,杨柳,等. 颗粒排列角度对砂土剪切特性的影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):447-454. (HE Linlin, FENG Chujie, YANG Liu, et al. Experimental study of influence of particle arrangement angle on shear properties of sand[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):447-454. (in Chinese))

[4] 梁越,喻金桃,张强,等. 骨架颗粒组成对散粒土管涌规律影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):63-69. (LIANG Yue, YU Jintao, ZHANG Qiang, et al. Experimental study on the effect of skeleton particle composition on piping law of cohesionless soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):63-69. (in Chinese))

[5] 刘胜,王媛,冯迪. 堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):10-16. (LIU Sheng, WANG Yuan, FENG Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):10-16. (in Chinese))

[6] FELL R, FRY J J. Internal erosion of dams and their foundations[M]. London:CRC Press,2007.

[7] LI Maoxin, FANNIN J R. Comparison of two criteria for internal stability of granular soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008,45(9):1303-1309.

[8] CHANG D S, ZHANG L M. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2013,139(9):1454-1467.

[9] MAROT D, ROCHIM A, NGUYEN H H, et al. Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology[J]. Natural Hazards,2016,83(1):365-388.

[10] 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.

[11] KODIEH A, GELET R, MAROT D, et al. A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches[J]. Acta Geotechnica,2021,16(2):347-365.

[12] SCHOLTES L, HICHER P Y, SIBILLE L. Multiscale approaches to describe mechanical responses induced by particle removal in granular materials[J]. Comptes Rendus Mécanique,2010,338(10/11):627-638.

[13] WOOD D M, MAEDA K, NUKUDANI E. Modelling mechanical consequences of erosion[J]. Géotechnique,2010,60(6):447-457.

[14] YANG Jie, YIN Zhenyu, LAOUAFA F, et al. Internal erosion in dike-on-foundation modeled by a coupled hydromechanical approach[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2019,43(3):663-683.

[15] HOSN R A, SIBILLE L, BENAHMED N, et al. A discrete numerical model involving partial fluid-solid coupling to describe suffusion effects in soils[J]. Computers and Geotechnics,2018,95:30-39.

[16] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. Canadian Geotechnical Journal,1985,22(2):215-225.

[17] WAN Chifai, FELL R. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2008,134(3):401-407.

[18] CHANG D S, ZHANG L M. Extended internal stability criteria for soils under seepage[J]. Soils and Foundations,2013,53(4):569-583.

[19] INDRARATNA B, ISRAR J, RUJIKIATKAMJORN C. Geometrical method for evaluating the internal instability of granular filters based on constriction size distribution[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2015,141(10):04015045.

[20] 刘清秉,项伟,BUDHU M,等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学,2011,32(增刊1):190-197. (LIU Qingbing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand [J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(Sup1):190-197. (in Chinese))

[21] GELET R,MAROT D. Internal erosion by suffusion on cohesionless gap-graded soils: model and sensibility analysis[J]. Geomechanics for Energy and the Environment,2022,31:100313.