

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231123003

恒定围压下间断级配散粒土内部侵蚀机理研究*

梁越^{1,2,3}, 罗安志¹, 杨牛虎⁴, 许彬^{1,2,3}, 代磊¹

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 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;
3. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,
贵州 贵阳 550000)

摘要:管涌侵蚀一直是水力学研究的重点,其是指在渗透水流作用下土体内部细颗粒发生迁移并形成渗漏通道的一种渗漏现象,且在围压条件下土体内部侵蚀过程会受到显著的影响。利用自主研发的应力动态联动式渗透变形试验装置对不同级配的散粒土在恒定围压条件下的侵蚀过程进行研究。设置三组不同的间断级配试样,对渗流过程中的渗流量、细颗粒流失量和渗透变形量进行测量。结果表明:试验前期渗流速度 v 和水力梯度 i 呈线性正相关,但围压作用使得 $i-v$ 曲线后期明显变缓不再符合达西定律;土体中间级配缺的越多,颗粒起动的临界水力梯度越小;且土体的不均匀系数对渗透系数的影响存在某一上限值。渗流过程中细颗粒的流失存在因堵塞而引起的自滤自稳定现象,该现象在骨架颗粒级配较为均匀时更易出现。土体在恒定围压条件下细颗粒流失导致体积收缩,而由于土体内部颗粒间的作用力突变,土体渗透变形呈现阶梯状变化,且在土体颗粒级配间断跨度大、内部细颗粒粒径小且单一的情况下阶梯状变化较为明显。

关键词: 间断级配散粒土; 恒定围压; 渗透系数; 体积变化量; 细颗粒流失量

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0224-09

Study on Internal Erosion Mechanism of Gap-Graded Granular Soil under Constant Confining Pressure

LIANG Yue^{1,2,3}, LUO Anzhi¹, YANG Niuhu⁴, XU Bin^{1,2,3}, Dai Lei¹

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University,
Chongqing 400074, China; 3. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Powerchina Guiyang Engineering Corporation Limited,
Guiyang 550000, China)

Abstract: Piping erosion has long been a focus in hydraulics research. It refers to a seepage phenomenon where fine particles within the soils migrate under the action of seepage flow, leading to the formation of seepage channels. The internal erosion process of the soils is significantly affected by confining pressure. This study investigated the erosion process of granular soils with different gradations under

* 收稿日期:2023-11-23;修回日期:2024-01-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52379097)、重庆市技术创新与应用发展专项基金项目(CSTB2022TIAD-GPX0045)、中国博士后科学基金面上项目(2023M730432)、重庆市博士后科学基金项目(CSTB2023NSCQ-BHX0223)、重庆市研究生科研创新项目(CYB22234)资助

作者简介:梁越(1985—),男,教授,博导,博士。主要从事水利工程灾害形成机理及防治方面的研究。

E-mail: liangyue2560@163.com

constant confining pressure by using a self-developed stress-dynamic linked seepage deformation experiment device. Three groups of gap-graded soil samples were prepared to measure the seepage flow, fine particle loss, and seepage deformation during the seepage process. The results showed that at the early stage of the experiment, the seepage velocity (v) and the hydraulic gradient (i) had a linear positive correlation, but the confining pressure caused the i - v curve to flatten significantly later on, deviating from Darcy's law. The more intermediate gradations the soils lacked, the smaller the critical hydraulic gradient at which particles began to move. Moreover, there was a threshold value for the effect of the soils' nonuniformity coefficient on the permeability coefficient. During the seepage process, the loss of fine particles led to self-filtration and self-stabilization due to clogging, which was more likely to occur when the skeleton particle gradation was relatively uniform. Under constant confining pressure, the loss of fine particles caused soil volume shrinkage. Due to abrupt changes in the inter-particle forces within the soils, the permeability deformation of the soils exhibited a stepwise change. This stepwise change was particularly pronounced when there was a large gap in the particle gradation of soils and the fine particles were small and uniform in size.

Keywords: gap-graded granular soil; constant confining pressure; permeability coefficient; volume change; fine particle loss

0 引言

管涌侵蚀是土体中细颗粒在渗透水流作用下沿土体孔隙发生运移,使得土体颗粒进行重分布的多相、多场耦合现象,是造成堤防失事的主要原因之一。管涌侵蚀造成的土石坝溃决是一个渐进的过程^[1]。其发展具有难以预测、作用机理复杂等特点。因此,开展管涌内部侵蚀问题的研究,探索其成因和发展规律是十分必要的。

许多学者针对影响管涌发展的土体几何条件(孔隙度、颗粒级配、细颗粒含量等),渗流水力条件(渗流方向、水力梯度、水头形式等)做了大量的研究。陈亮等^[2]和张亮亮等^[3]研究了不连续级配无黏性土的细颗粒含量对渗流侵蚀的影响,并分析变水头作用和渗流沿程局部水力梯度的时空演变,揭示了土体渗蚀的演变规律。朱秦等^[4]和田大浪等^[5]利用自主研发的渗透仪对土体的颗粒级配进行研究,结合土体的 D_{15}/d_{85} 值及堆积状态分析了渗流可动颗粒的迁移模式,证实了采用大尺寸试验执行渗透试验的必要性。由于土体天然的不透明性有碍于分析渗流内部侵蚀,倪小东等^[6]和梁越等^[7]利用透明土技术从细观角度揭示渗流侵蚀规律,通过颗粒间接触力链的细观角度分析颗粒摩擦系数、颗粒级配和细料含量对管涌发展的影响。而对于渗流水力条件,施倩等^[8]基于管涌通道断面为城门洞形提

出管涌溃坝数学模型,通过模拟通道顶拱发展和溃口水土耦合并对比实测案例验证了该模型的合理性。J. C. Pol等^[9]进行大规模管涌侵蚀试验,通过孔隙压力变化成功推导出了管涌通道在空间和时间上的发展过程,为室内小规模管涌试验提供了基准模型。梁越等^[10]通过自行设计的变角度模型槽,开展了无黏性土颗粒起动试验,探究了渗流方向与重力方向夹角对临界水力梯度的影响。随着研究的深入,一些学者开始关注管涌侵蚀过程中的土体应力状态,并做了许多探索。其中,罗玉龙等^[11-12]和Y. Liang等^[13]对不同应力状态下的管涌发展规律进行研究,定义了低临界水力梯度和高临界水力梯度,明确了受压状态对管涌临界水力梯度的提升作用。王明年等^[14]考虑土体有效应力和细颗粒应力折减,建立渗流场中细颗粒受力模型,根据极限受力平衡状态计算潜蚀过程中砂性土细颗粒起动临界水力梯度。

国内外学者对管涌侵蚀已有较为丰富的研究,但对于土体颗粒级配这一影响因素,现有研究通常是基于连续级配土样开展自上而下的渗流侵蚀试验。但实际工程中土体是非理想状态的间断级配,管涌通道的形成往往是自下而上的,且真实的土体应力状态也应该被考虑到试验中。鉴于此,本文利用自主研发的应力动态联动式渗透变形试验装置在稳定围压条件下开展散粒土内部侵蚀破坏试验。对恒定围压条件下不同颗粒级配土体在管涌中的

临界水力梯度变化、渗流流速特点、细颗粒流失过程和渗透变形规律等进行了研究,揭示了围压作用下管涌的侵蚀特征。

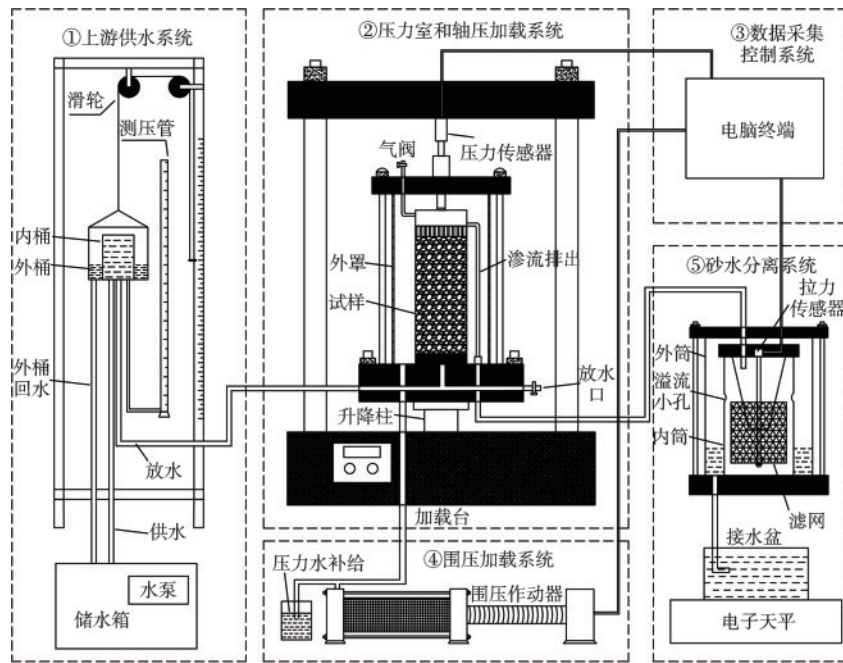
1 试验方案设计

1.1 试验装置

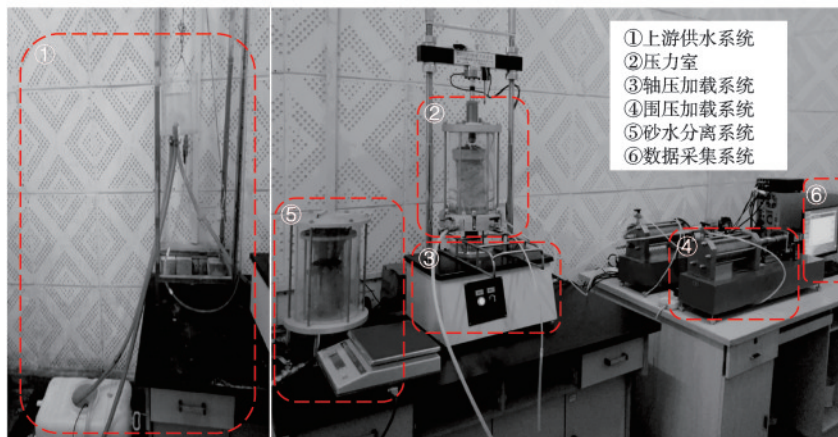
试验采用自主研发的应力动态联动式渗透变形试验装置,可在不同应力条件下开展渗透变形试验,如图1所示。其组成部分主要包括:上游供水系统、压力室、围压加载系统、轴压加载系统、砂水分离系统和数据采集系统等。

上游供水系统采用内外两层有机玻璃桶提供稳定水头,外桶高230 mm,厚8 mm,内径200 mm,内桶高140 mm,厚10 mm,内径125 mm。并在内桶底部设置测压管测量上游实时水头。

压力室包括下部钢制压力室底座、上部有机玻璃压力室外罩及内部试样,可放置直径为100 mm、高200 mm的圆柱形试样。试样上下设置透水板,上板孔径5 mm,下板孔径1 mm(粘贴0.075 mm滤网)。已有研究表明采用刚性壁的常规渗透仪可能会产生壁与试样之间的界面渗流^[15],因此,本研究采用柔性膜来减少界面渗流的影响,并实现渗透变形的测量。围压加载系统主要是通过围压作动器将水压出或吸入储水仓以控制压力室中试样所处



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 应力动态联动式渗透变形试验装置

Fig.1 Stress-dynamic linked seepage deformation experiment device

围压,加载范围为0~500 kPa,监测试样体积变化,精度为0.01 cm³。储水仓内设置与电脑连接的压力传感器以实现围压自适应调节。轴压加载系统包括加载台、承载架、升降柱、竖向压力传感器等,竖向最大输出压力为25 kN,精度10 N。

砂水分离系统主要由颗粒过滤器、拉力传感器、电子天平等组成,其中颗粒过滤器由孔隙小于0.075 mm的砂网包裹多孔隙钢桶制成,拉力传感器测量可测得流失细颗粒浮容重并将其传入电脑,分离后的水作为渗流量采用电子天平测得。数据采集控制系统通过软件对压力传感器、拉力传感器、测压管、电子天平数据进行采集,并实时分析压力室围压以控制围压恒定。

1.2 试验工况

在本试验中,由于试验设备支持试样直径为100 mm,因此按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[16]的要求,散粒土的最大粒径应当不超过10 mm。将土料烘干,再进行筛分,筛分粒径组为0.075~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1.0 mm、1.0~2.0 mm、2.0~5.0 mm、5.0~8.0 mm、8.0~10.0 mm(图2)。

本试验采用三种不同的颗粒级配工况,研究其对散粒土渗流侵蚀的影响,颗粒级配曲线如图3所示,编号分别为A、B、C。将粒径为0.075~0.25 mm的颗粒定义为较细颗粒,粒径为5.0~10.0 mm的颗粒定义为较粗颗粒。其中A试样较细颗粒含量为10%,较粗颗粒含量为40%;B试样较细颗粒含量为15%,较粗颗粒含量为50%;C试样较细颗粒含量为20%,较粗颗粒含量为60%。由A试样到C试样,

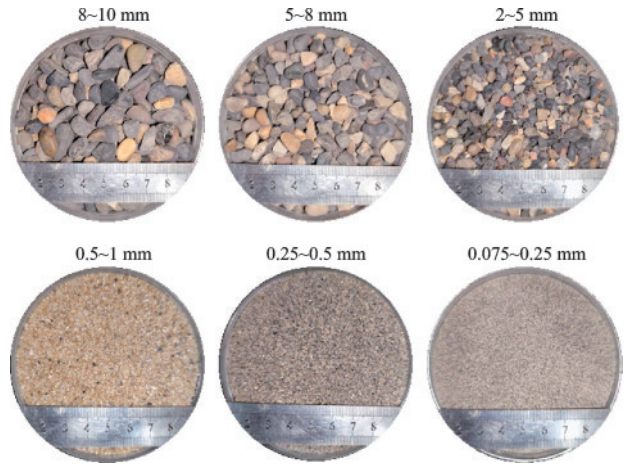


图2 土样照片

Fig.2 Soil sample photos

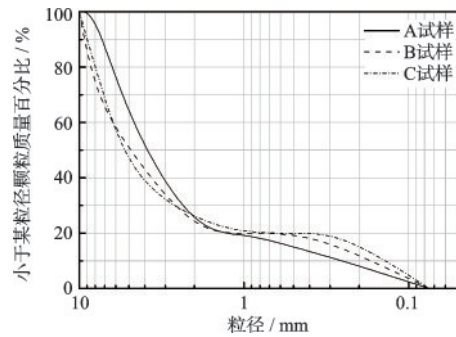


图3 试样颗粒级配曲线

Fig.3 Particle size distribution curves of the sample

颗粒粒径分布逐渐向较细和较粗两端靠拢。所选用试样除颗粒级配不同以外,其相对密度值均为0.55,侵蚀过程中试样所处围压值为30 kPa。试验所采用的散粒土属于间断级配土,在研究其颗粒迁移时,其粗细颗粒分界点设置为1 mm^[17],相关土体参数见表1和表2。

表1 试验组土体稳定性参数

Table 1 Soil stability parameters in experiment group

颗粒级配	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	细颗粒含量/%	D_{15}	d_{85}	D_{15}/d_{85}
A	20	5	20	2.75	0.65	4.23
B	37.14	7.06	20	2.70	0.34	7.94
C	42	7.87	20	3.00	0.23	13.33

表2 试验组土样参数

Table 2 Parameters of soil samples in experiment group

颗粒级配	相对密度 D_r	孔隙比 e	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}	孔隙率/%	试样总质量/g
A	0.55	0.51	0.75	0.32	33.8	3 102
B		0.48	0.69	0.30	32.4	3 178
C		0.49	0.70	0.31	32.9	3 157

1.3 试验流程

(1) 试样的制备

为了获得均匀分布的粗细颗粒混合体,参照 F. Bendahamne^[18]的方法,采用土颗粒含水量为 7% 进行搅拌混合。结合《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[14]将拌合均匀的土样分五层击实,每层 40 mm,装样前先将橡皮膜内侧均匀涂满凡士林,避免橡皮膜被尖锐砂砾割破的同时也防止橡皮膜和试样之间产生优势渗流通道。

(2) 试样饱和和固结

土样装填完毕后,通过水泵向压力室内灌水排出全部空气并密封压力室。通过围压作动器以 5 kPa/min 的速度进行围压加载,最大至 30 kPa。加载过程若围压值不稳定,且压力室上盖和下底座之间渗水,则重新密封压力室;若未出现渗水现象,则压力室的水流入了试样中,应当重新密封试样;若橡皮膜发生破损则更换橡皮膜并重新装样。试样密封后对其进行饱和,上游水箱每隔 4 min 提升 1 cm,直至上游测压管水位与压力室内的试样顶部齐平后停止抬升,保持该状态 120 min,使试样充分饱和。试样饱和后保持围压在 30 kPa 状态下打开压力室排水阀固结 4 h。

(3) 试样内部侵蚀阶段

试验开始前打开压力室连接大气的阀门,保证试样顶部即渗流侵蚀下游的气压与外界气压一致,设置恒定围压为 30 kPa。向砂水分离系统内注水,直至水位与溢水口齐平。试验采用变水头渗透,在试验初期,即水力梯度 $i < 1$ 时,以 0.5 cm/min 的速度提升水头;在试验中期,当水力梯度 $1 < i < 2$ 时,以 1 cm/min 的速度提升水头;在试验后期,水力梯度 $i > 2$ 时,以 0.5 cm/min 的速度提升水头。各级渗流间隔时间为 2 min,在保证渗流稳定后施加下一级水头。试验过程中通过拉力传感器采集涌砂量,电子天平采集渗流流量,同时通过压力水储存仓中体积的变化量得到试样体积的变化量。

2 试验结果及分析

2.1 水力梯度与流速变化规律分析

本试验中假设渗流下游即试样顶部的水流溢出方向均垂直于试样横截面,渗流过水断面为试样上表面,据此计算过水断面上的平均渗流速度:

$$\bar{v} = Q/A \quad (1)$$

式中, \bar{v} 为平均渗流速度(cm/s); Q 为渗流量(cm^3/s); A 为试样的过水断面面积(cm^2)。

事实上,在散粒土渗流过程中,水流是通过一系列形状各异、大小不同的曲折通道行进的。由表可得 A、B、C 三种颗粒级配试样的孔隙率分别为 0.338、0.324、0.329。可算出实际流速 v :

$$v = \bar{v}/n \quad (2)$$

式中, v 为实际流速(cm/s); \bar{v} 为平均渗流速度(cm/s); n 为试样孔隙率。

图 4(a)、(b)、(c) 分别是试样 A、B、C 的渗流实际流速随水力梯度变化曲线,采用五阶函数可以较好的拟合。

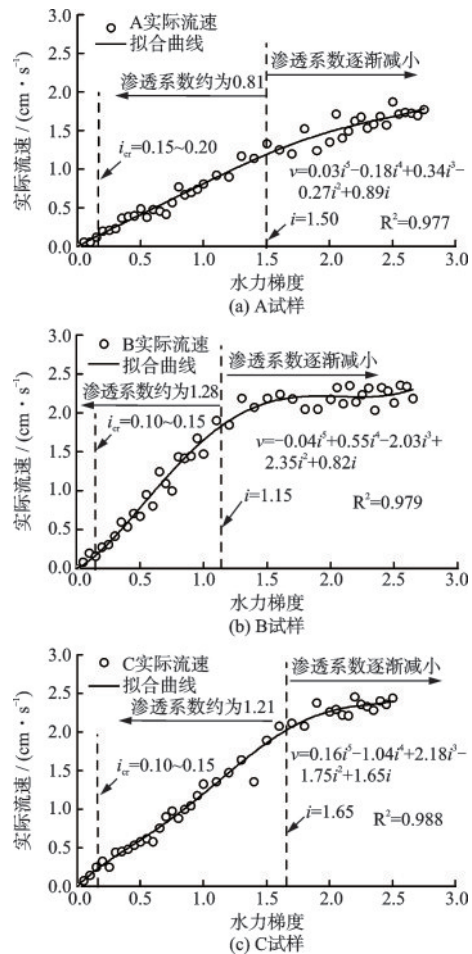


图 4 实际流速随水力梯度变化曲线

Fig.4 Change curves of actual flow velocity with hydraulic gradient

上游供水系统水头提升最小为 1 cm,即水力梯度增加量最小为 0.05,试验中以颗粒发生流失作为判断试样达到临界水力梯度的标准^[11]。对临界水

力梯度进行范围确定, A组试验 $i=0.20$ 时, 开始测得细颗粒流失量, 说明 $i_{cr}=0.15\sim 0.20$; B、C组试验均在 $i=0.15$ 时, 细颗粒开始流失, $i_{cr}=0.10\sim 0.15$ 。散粒土临界水力梯度大小与其级配曲线形态密切相关, 随着颗粒粒径朝级配曲线两端分散, 即间断级配跨度增大, 土体临界水力梯度减小。

整个渗透过程前期流速随着水力梯度的增加而逐渐增大, 呈明显的线性关系, 符合达西定律, 由 $i-v$ 拟合曲线斜率得到土样渗透系数。其中, A试样渗透系数最小, 约为 0.81 cm/s ; B试样渗透系数最大, 约为 1.28 cm/s ; C试样的渗透系数较B试样有所减小, 约为 1.21 cm/s 。由表1可知, A、B和C三组试样的不均匀系数逐渐递增, 且因为是缺少中间级配的散粒土, 不均匀系数均较大, 一定范围内渗透系数随着不均匀系数的增大有明显的增加, 相较于A试样, B试样不均匀系数在增长86%左右后渗透系数随之增长了58%。但该增长趋势存在一定上限, 不均匀系数过大, 渗透系数不再增加, 甚至会有减小的趋势, 如试样C的不均匀系数在试样B的基础上增加13%, 但渗透系数却减小了6%。这与相关学者的研究相符合^[19], 表明土体不均匀系数只能作为判断土体渗透性的初步因素。本试验中水力梯度到达某一界限后, 渗透系数明显减小, 出现非达西定律特征^[20], 可能是恒定围压状态下土体抗渗能力得到提高导致。

2.2 体积变化和颗粒流失特征分析

利用 A. Kezdi^[21] 标准判断可知 A、B、C 三种级配土样结构稳定性逐渐递减。根据南京水利科学研究所的管涌、流土判别方程^[22] 进行判别, 试验试样全部属于管涌型土。三组试样在试验过程中均发生细颗粒的大量流失并形成不规则的渗流通道, 渗流初期细颗粒流失主要来自试样上部和试样表面, 导致试样表面的颗粒流失尤为明显。以 A 试样侵蚀前后情况为例, 详细特征如图 5 所示。

图 6 为三组试样累积细颗粒流失量及体积变化量随时间变化关系曲线。结合图中曲线的变化趋势分析土体颗粒级配对散粒土渗流侵蚀的影响规律。

图 6(a) 可知, 该级配条件下的散粒土细颗粒流失速度并未发生明显变化, 累积细颗粒流失量总体稳步增加, 在 4 100 s 后细颗粒流失速度逐渐放缓,

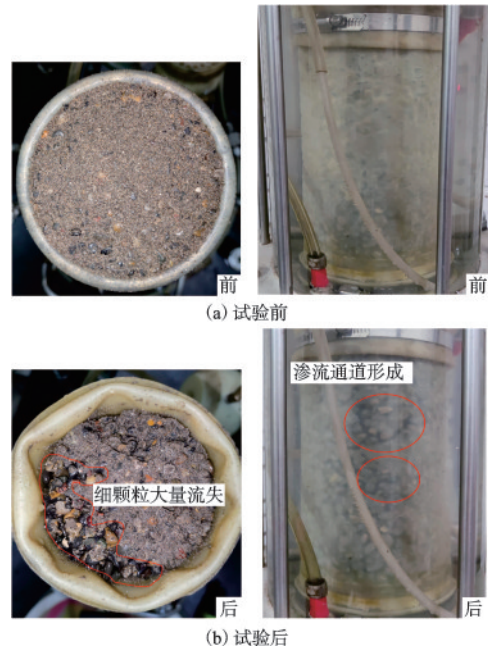


图 5 试验前后 A 试样内部颗粒流失情况

Fig.5 Particle loss in sample A before and after experiment

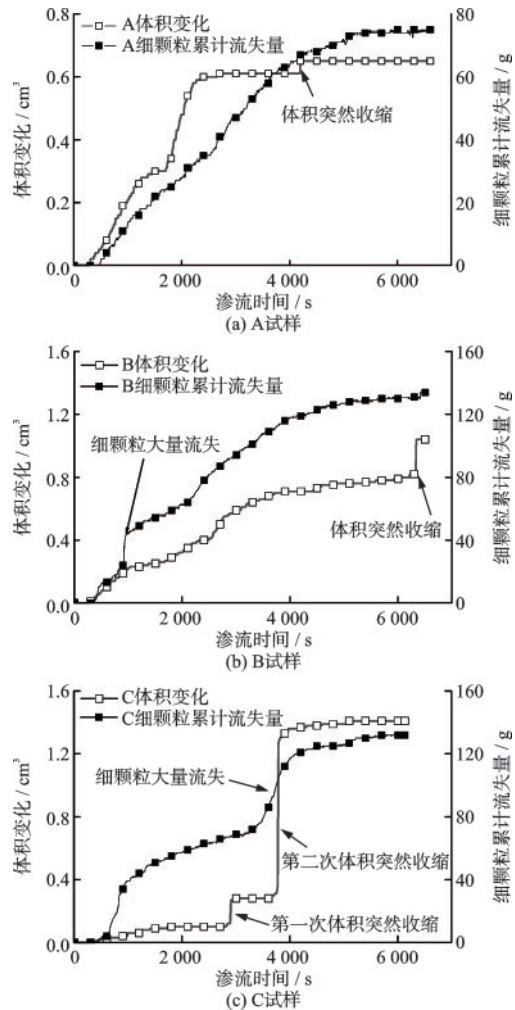


图 6 累计细颗粒流失量与体积变化曲线

Fig.6 Cumulative fine particle loss and volume change curves

截止试验结束的6 610 s共流失细颗粒75 g。同时,试样在30 kPa恒定围压作用下体积出现阶梯状收缩变化,其中1 245~1 705 s为体积变化第一阶梯,2 210~4 195 s为体积变化第二阶梯,之后在4 195 s发生试样体积的突然收缩,4 195 s到试验结束为体积变化第三阶梯。试样体积出现收缩现象的本质是土体结构的变化,当粗颗粒构成的骨架达到稳固时,体积收缩得到减缓形成阶梯状变化。A试样在4 195 s体积突变,而累计细颗粒流失曲线无明显变化,可能是围压作用下试样中部分骨架颗粒发生错动导致^[23]。

图6(b)可知,试样B细颗粒流失随渗流时间的增加而增多,值得注意的是在910~965 s,累积细颗粒流失量剧增,这个阶段试样持续体缩,而后体积变化速率下降,细颗粒流失速度也在同一时间段放缓。细颗粒的大量流失可能是试样在渗流初期存在因制样而形成的细颗粒弱接触^[6],在水力梯度增加到一定程度后,充当临时颗粒骨架的细颗粒发生松动而开始集体流失。截止试验结束6 505 s共流失细颗粒134 g。试样体积收缩过程中存在较缓和阶梯状变化过程,在试验后期出现了与A试样相同的体积突缩。B试样相较于A试样,缺少的中间级配增多,其试验过程中细颗粒流失量及试样体积变化量也随之增加。

图6(c)可知,累积细颗粒流失量及体积变化曲线均呈阶梯状变化。结合已有研究^[12,24],在自下而上的渗流过程中,下部流失细颗粒流经上部土体时可能遇到比其粒径小的孔隙而发生截留堵塞,并形成更小的孔隙而截留之后的流失颗粒,渗流过程达成一定程度上的自滤自稳定^[24]平衡,水流转而带走其它薄弱位置的细颗粒形成新通道。管涌现象宏观上就是由无数个这种复杂的细观机制作用下组成的。这种堵塞、换道交替作用,使得整个侵蚀过程充满间歇性和随机性。当水力梯度继续增加后,细颗粒形成的弱接触被破坏,细颗粒再次迁移继而形成细颗粒流失曲线的阶梯状变化。显然B也存在类似的先稳定再失稳的现象,而因为A的细颗粒粒径分配较均匀,截留堵塞后细颗粒之间的弱接触较为牢固,未出现明显的堵塞颗粒再迁移的现象。值得注意的是C试样在体积变化过程中发生了两次突缩,第一次突缩与A试样发生的类似,即颗粒流失速度未发生猛烈变化,仅试样体积改变较大。而第

二次突缩跨度较大达到了 0.96 cm^3 ,占试样整体收缩的68%,细颗粒流失曲线发现在试样突缩的同时发生了颗粒的大量流失。可见渗透侵蚀是一个实时变化的过程,充满随机性和不确定性,另外考虑到累积细颗粒流失量监测数据滞后等因素,可认为试样体积发生剧烈变化将会导致细颗粒的快速流失。截止试验结束6 130 s共流失细颗粒132 g。结合试样的颗粒级配曲线得出,C试样与B试样缺少跨度相似的中间级配,在细颗粒质量百分数相同的情况下C试样细颗粒粒径较小且单一,从而土体更容易发生细颗粒流失而引发土体的内部结构失稳,继而在恒定围压下发生土体的崩塌和重构。

3 结 论

利用自制的应力动态联动式渗透变形试验装置对3组不同颗粒级配的散粒土进行恒定围压饱和渗透试验,通过分析试验过程中的渗流流速、细颗粒流失量、体积变化量等参数变化规律得出以下主要结论:

(1) 恒定围压条件下,水力梯度较小时,间断级配散粒土渗流流速与水力梯度呈线性正相关,符合达西定律。随着土体颗粒向较细颗粒和较粗颗粒两端分配,即缺少的中间级配越多,土体临界水力梯度越小。不均匀系数在一定范围内与土体的渗透系数呈正相关,但当不均匀系数过大时,土体渗透系数不再随不均匀系数的增加而增大,而是存在保持不变甚至减小的趋势。渗透系数提高到一定界限后出现明显的减小, $i-v$ 曲线出现非达西定律变化。

(2) 恒定围压条件下,土体细颗粒流失量随渗流时间的增加而增加,缺少中间级配较多的B、C试样在流失过程中细颗粒流失存在滞缓现象,这可能是细颗粒在流失过程中遇到比其粒径更小的孔隙发生截留堵塞造成,该堵塞现象在土体骨架颗粒粒径分配较为均匀时更容易出现。

(3) 土体细颗粒的流失造成内部孔隙扩大,在恒定围压条件下土体体积收缩,且由于土体内部骨架受压力作用发生错动或滑动,在土体体积随时间缩小的过程中存在体积突缩。本试验的三组间断级配土体均存在该现象,但在土体颗粒级配间断跨度较大,内部细颗粒粒径较小且单一的情况下突缩现象较为明显。

参考文献:

- [1] 钟启明, 沈光泽, 曹伟. 土石坝溃决机理模型试验研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 615-623.
Zhong Q M, Shen G Z, Cao W. Progress in model test research on the mechanism of earth rock dam collapse [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 615-623. (in Chinese)
- [2] 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, 110.
Chen L, Teng Y Z, Cai G D, 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, 110. (in Chinese)
- [3] 张亮亮, 邓刚, 陈锐, 等. 不连续级配无黏性土渗蚀演变特征研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1412-1420.
Zhang L L, Deng G, Chen R, et al. Experimental investigation on evolution process of suffusion in gap-graded cohesionless soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7): 1412-1420. (in Chinese)
- [4] 朱秦, 苏立君, 刘振宇, 等. 颗粒迁移作用下宽级配土渗透性研究[J]. 岩石力学, 2021, 42(1): 125-134.
Zhu Q, Su L J, Liu Z Y, et al. Study of seepage in wide-grading soils with particles migration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 125-134. (in Chinese)
- [5] 田大浪, 谢强, 宁越, 等. 间断级配砂砾石土的渗透变形试验研究[J]. 岩石力学, 2020, 41(11): 3663-3670.
Tian D L, Xie Q, Ning Y, 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)
- [6] 倪小东, 寇恒琦, 左翔宇, 等. 基于透明土技术与颗粒流方法联合开展管涌微观机理研究[J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1482-1497.
Ni X D, Kou H Q, Zuo X Y, et al. Research on meso mechanism of piping based on transparent soil technology and particle flow method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12): 1482-1497. (in Chinese)
- [7] 梁越, 代磊, 魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1133-1140.
Liang Y, Dai L, Wei Q. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1133-1140. (in Chinese)
- [8] 施倩, 钟启明, 吕晓倩, 等. 土石坝管涌溃坝过程数学模型及应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 511-519.
Shi Q, Zhong Q M, Lyu X Q, et al. Numerical model for piping failure of earth-rock dam and its application [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 511-519. (in Chinese)
- [9] Pol J C, Kanning W, Jonkman S N. Temporal development of backward erosion piping in a large-scale experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(2): 04020168.
- [10] 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 Y, Zhang Q, Zeng C, et al. Study on the starting mechanism of cohesionless soil particles under variable seepage [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2016, 35(2): 89-92, 104. (in Chinese)
- [11] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验装置的研制及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2108-2114.
Luo Y L, Wu Q, Zhan M L, et al. Development of seepage-erosion-stress coupling piping test apparatus and its primary application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2108-2114. (in Chinese)
- [12] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究[J]. 岩石力学, 2012, 33(增1): 73-78.
Luo Y L, Wu Q, Zhan M L, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup1): 73-78. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 王明年, 江勇涛, 于丽, 等. 砂性土细颗粒起动机理水力坡降计算方法[J]. 岩石力学, 2020, 41(8): 2515-2524.
Wang M N, Jiang Y T, Yu L, et al. Analytical solu-

- tion of startup critical hydraulic gradient of fine particles migration in sandy soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2515-2524. (in Chinese)
- [15] Kenney T C, Lau D. Internal stability of granular filters [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22 (2) : 215-225.
- [16] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [17] 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [18] Bendahmane F, Marot D, Alexis A. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(1): 57-67.
- [19] 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 Z X, Zhou J, Zhang G, et al. Experimental study of particle grading impact on piping mechanism [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(2): 200-208, 218. (in Chinese)
- [20] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [21] Kezdi A. *Soil physics* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [22] 毛昶熙. 管涌与滤层的研究: 管涌部分 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(2): 209-215. Mao C X. Study on piping and filters: part of piping [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 209-215. (in Chinese)
- [23] 陈波, 李永强, 刘旭锋, 等. 颗粒材料在三轴试验中滞滑现象的研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(3): 568-575. Chen B, Li Y Q, Liu X F, et al. Study on stick-slip behaviour of granular materials in triaxial test [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(3): 568-575. (in Chinese)
- [24] 刘杰, 张雄. 多级配砾石土反滤设计方法试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(6): 5-13. Liu J, Zhang X. Study on filter design of broadly-graded soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(6): 5-13. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)