DOI：10.16285/j.rsm.2016.0981

粗粒土渗透损伤特性试验研究

袁 涛[1]，蒋中明[1, 2]，刘德谦[1]，熊小虎[1]

（1. 长沙理工大学 水利工程学院，湖南 长沙 410004；2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室，湖南 长沙 410004）

摘 要：为深入认识渗透变形对粗粒土渗透性及压缩性的影响，利用自主研发的加载式大型渗透变形仪对不同级配的粗粒土试样进行渗透变形全过程试验及侧限压缩对比试验，获得了不同试件产生渗透变形的临界水力梯度、渗透系数演化规律及损伤变化特性。研究成果表明：渗透变形过程中渗流路径中下游部位产生了渗透挤密效应，引起局部渗透性降低；在后期增加的水头作用下，先前产生渗透挤密部位的渗透性逐渐增大。试样产生渗透变形后，压缩模量减小；颗粒级配不同，渗透破坏引起的压缩损伤程度亦不相同。试件产生渗透变形后，在重力和渗透力作用下，试件结构将产生重构现象。

关 键 词：粗粒土；渗透变形；渗透损伤；骨架重构

中图分类号：TU 433 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018)04－1311－07

Experiment on the seepage damage coarse grain soil

YUAN Tao[1], JIANG Zhong-ming[1, 2], LIU De-qian[1], XIONG Xiao-hu[1]

（1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410004, China）

Abstract: To explore the influence of seepage deformation on the permeability and compressibility of coarse grain soil, the whole process of seepage failure and compression experiment with lateral confinement on coarse grain soils with different gradations were conducted using seepage failure instrument developed by the authors. The critical hydraulic gradient, evolution law of permeability coefficient and damaged characteristics were obtained through analyzing the measured data and observed phenomenon during the test process. The results indicate that the seepage extrusion effect will generate firstly at the location of downstream along seepage path during seepage failure process and induce decrease of the permeability at the location. The permeability of the seepage extrusion part increases gradually with the increment of the experiment water head. The compression modulus of samples decreases after the seepage failure occurred. The degree of damage of the sample due to seepage failure is different on different grading samples. For soil samples after seepage failure, the structure of soil samples is reconstructed under the influence of gravity and seepage force.

Keywords: coarse grain soil; seepage failure; damage due to seepage; structure reconstruction

1 引 言

粒径分布在 0.075～60 mm 之间的颗粒称为粗粒粒组，其含量超过全重 50%的土类称为粗粒土。粗粒土地基是水利堤防工程建设中常见的地基类型。由于粗粒土颗粒之间缺乏黏结性能，在渗流作用下，砂土地基经常出现渗透变形破坏现象[1]。在渗透变形破坏过程中，将不可避免地伴随着土体的渗透损伤[2−3]。土体在渗流作用下产生渗透变形后，部分细小颗粒从土体的内部被携带出来，从而影响土体颗粒结构组成，其后果就是增大土体的渗透性、降低土体的抗剪强度和抗变形的能力[4−5]。在渗控处理措施或处理时机不当情况下，极易引起堤防地基产生渗透破坏，最终导致溃坝决堤等灾害[6]。Fox 等[7]通过自制三维土箱渗透破坏模型，借助激光扫描仪研究了砂土的渗透破坏发展过程，并指出堤防破坏的结果是颗粒迁移流失引起的结构破坏和强度降低所导致。周健等[8]利用显微摄像可视化跟踪技

收稿日期：2016-05-03
基金项目：水能资源利用关键技术湖南省省重点实验室开放研究基金(No. PKLHD201305)资助。
This work was supported by the Open Research Fund of Hunan Province Key Laboratory of Key Technologies for Water Power Resources Development (PKLHD201305).
第一作者简介：袁涛，男，1992 年生，硕士研究生，主要从事渗透破坏方面的学术研究工作。E-mail：m15700774625@163.com
通讯作者：蒋中明，男，1969 年生，博士后，教授，主要从事岩土工程及水工结构工程方面研究工作。E-mail：zzmmjiang@163.com

术从细观角度研究了管涌从开始到破坏的整个过程。倪小东等[9]从数值仿真角度较深入地分析了土体内部细颗粒运移引起管涌破坏的动态过程。

目前，虽然有许多文献研究砂土的渗透变形特性和渗透破坏过程，并取得了丰富的成果[10–14]。但在渗流引起的土工结构和地层破坏中，大部分学者重点关注砂土体抗渗透变形能力–临界水力梯度之间关系，对渗流引起的砂土地基损伤问题认识不足。为了更好地认识砂土地基在渗流作用下的渗透损伤特性，本文通过总结现有土体渗透变形研究成果，并对自主研发的大型渗透变形仪再次进行改进，开展粗粒土渗透损伤条件下压缩变形特性试验研究，为砂砾石土地基渗透损伤引起的沉降变形演化特性分析提供参考依据。

2 试验方案

通常情况下，粗粒土渗透变形室内试验采用直径为 20 cm 或 30 cm 的垂直渗透变形仪，仪器高度为内径的 2～3 倍。为了研究砂砾石土的渗透损伤机制，本文参考了文献[15–16]等相关规范研制了可施加 1.0 MPa 压力的大直径渗透变形仪，如图 1 所示。



图 1 渗透试验仪器

Fig.1 Instrument of permeation test

整套系统由垂直渗透仪，供水系统和测量系统组成。渗透仪采用内径 280 mm、高度 500 mm 的透明有机玻璃筒，外加一块 3 mm 孔径（远大于最小粒径）透水性极大兼具有反滤作用的渗透板；供水系统由水泵、水箱、供水管路、测压管路及压力调节阀门等组成；测量系统包括测压管、百分表、压力表和流量计。测压管分别安装在试件上部（400 mm）、中部（250 mm）、下部（100 mm）筒壁上，见图 1。同时，为了能够直接准确量测出砂土渗透破坏前后的压缩变形特性，在整个渗透试验过程中将百分表（0～50 mm）固定在仪器支架上。

试验试件的制备选择的级配曲线如图 2 所示，表 1 给出了试样颗粒特征指标。

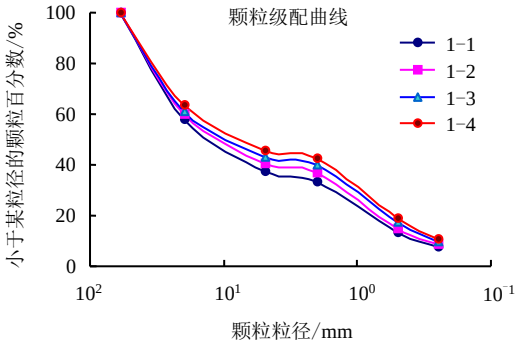


图 2 试验土样级配曲线

Fig.2 Gradation curves of test soil

表 1 试样颗粒特征指标

Table 1 Characteristics of the sample particles index

编号	d_{10} /mm	d_{30} /mm	d_{60} /mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	制样密度 /kg
1–1	0.36	2.00	23.0	63.89	0.48	1 902.4
1–2	0.30	1.45	21.0	70.00	0.33	1 898.5
1–3	0.25	1.05	19.2	76.80	0.23	1 886.4
1–4	0.23	0.91	17.0	73.91	0.21	1 880.4

本次试验选取的 4 种粗粒土试样细颗粒质量百分比在 13%～20%之间，试样 1–1～1–4 中的细颗粒含量依次增大，粒径大于 2 mm 的颗粒含量在 57.2%～66.52%之间，颗粒形状以圆形和亚圆形为主，属于粗粒土中的圆砾石土。最大粗颗粒粒径介于 26～20 mm 之间。4 种试样配料质量都为 37 kg，天然含水率都为 0.015。分别对 4 个试样进行渗透试验前和渗透破坏后的侧限压缩试验，以及渗透变形试验。为了保证各粒径颗粒分布在空间的相同性，试样制备时对土样进行充分搅拌，装料时进行分层装填、夯实，装填层数、夯实次数及夯实部位尽量保持一致。装料之前在筒壁上涂抹凡士林，以避免沿筒壁形成渗透破坏通道。

本试验的试验流程分为 2 阶段：第 1 阶段，试件侧限压缩试验；第 2 阶段为渗透破坏后的侧限压缩试验，其过程为：试样制作→渗透破坏试验→侧限压缩试验。

第 1 次进行侧限压缩试验后，需将试样挖出，重新制作试件，然后进行渗透变形试验。待试样发生渗透破坏后，静置 6 h，然后进行侧限压缩试验。侧限压缩试验加荷等级分：100、200、300、400、500 kPa。每级加载 1 h 内压缩量不超过 0.01 mm 方可读数。渗透试验每次待百分表示数和测压管读数彻底稳定然后提升供水水头（平均每 20 min 提升一

次），每次提升高度为 20 cm。

3　试验成果分析

3.1　试验现象

对试样 1−1、1−2、1−3、1−4 进行渗透破坏全过程试验。渗透试验初始阶段，有机玻璃筒内水面清澈。水头提升时，水面会出现短暂浑浊现象，但很快又重新恢复清澈。随着水头进一步增大，试样表面局部出现细砂缓缓从透水板圆孔中逸出现象；当供水水头逐级增高到一定水头高度，透水板上局部透水孔出现水柱，冒水翻砂现象，如图 3(a)所示。水头抬升至较大值后，水面迅速变浑浊，大量细砂从透水板圆孔中连续不断地冒出，如图 3(b)所示，试样产生渗透破坏。产生上述现象的原因可能是：试验初期，试样表层附近中存在的少量细颗粒在较小的渗透力作用下从试件中逃逸，导致水面出现短暂的浑浊状态；在后期逐渐增加的水头（小于临界水力梯度）作用下，通过试件的水体逐渐恢复清澈，表明试件结构在渗透力作用下保持相对稳定；当试验水头急速提高，作用在试件上的水力梯度超过临界水力梯度后，试件中的部分细颗粒被水流带出到试件表面，并堆积在渗流出口处，水流直接由通道向上冒出，形成喷泉式水柱，如图 3 所示。



(a) 冒水翻砂



(b) 大面积浑浊冒砂

图 3　试验过程中渗透变形现象

Fig.3　Seepage failure behavior during the test

试验过程中，渗透力对颗粒骨架的顶托作用导致试样整体缓缓抬升，使得透水板向上移动。百分表示数也随着水头逐级增加而缓缓增大；当试样接近渗透破坏时，百分表示数出现大幅度增加，随后读数略有减小。

图 4 为渗透试验过程水力梯度−渗流流速($\lg J$-$\lg v$)变化特征曲线。试样 1−1～1−4 出现浑浊现象时的水力梯度非常接近，数值介于 0.7～0.9 之间。试样 1−1 在整个渗透试验过程中现象较为平稳，水力梯度达到 0.99 时，开始出现持续的细颗粒跳动现象。水头缓缓增大，试样继续出现颗粒跳动现象。整个过程较少出现浑浊、冒水翻砂现象。当水力梯度达到 1.69 时，试样出现较大程度的渗透破坏，土体出现微弱沉降变形，随后测压管水位降低。试样 1−2、1−3 出现细颗粒跳动的水力梯度分别为 1.14、1.17，破坏时水力梯度分别为 1.66、1.72，且都出现了不同程度的沉降变形。

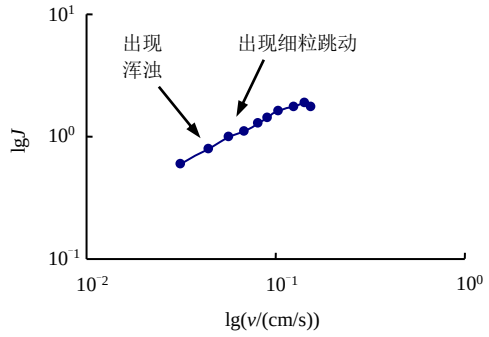
试样 1−4 的水力梯度达到 1.23 时出现细颗粒跳动现象，随着水头增大，透水板上多处透水孔出现细颗粒跳动现象。当水力梯度达到 1.76 时，试样出现大面积浑浊冒水现象，随后试样发生较大塌陷变形，测压管水位降低，水力梯度减小。

3.2　渗透性演化及损伤特性

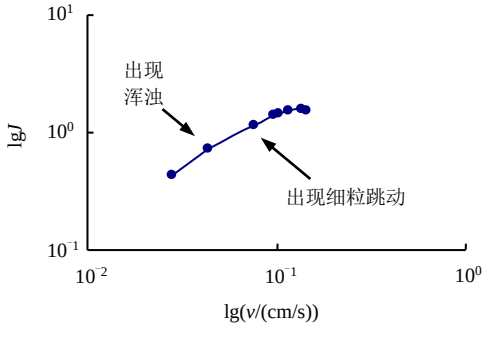
图 5、6 分别为渗透试验过程中渗透系数与供水水头、水力梯度与供水水头之间的变化关系曲线。根据 3 个部位测压管的水头，分别计算上、下半部分以及整体试样的水力梯度，然后通过达西定律 $K = q/Ai$ 求得相应部分的渗透系数。由于试件制样过程中采用自下而上的制作方案，因此，试件上、下部分的密度不可避免会出现一定的差异，其初始渗透性也就存在不同。由于试件制作的原因，试件下半部分相较上半部分更密实，因此，渗透性的测试成果是下半部分渗透系数要小于上半部分，如图 5 所示；水力梯度则是下半部分大，上半部分小，如图 6 所示。

试验初期，位于渗流路径上游部分区域的细颗粒会在渗透力的作用下首先向渗流路径的下游部位迁移，阻塞下游渗流路径上的渗透通道，形成具有渗透挤密效应的渗透挤密区（见图 7），此时渗透系数表现为减小的过程；试验中期，随着试验水头的进一步增大，位于渗流路径下游部分颗粒在逐步增大的渗透力作用下被冲破，孔隙空间增大，渗透系数也随之增大，如图 5 所示。试验后期，随着作用水头的进一步提高，试件上半部分（即渗流路径的下游）在更大渗透力作用下，使得试件土体出现更

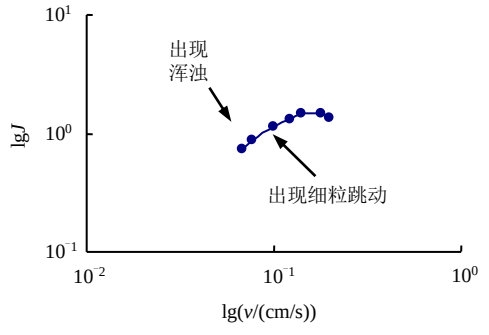
多或更大的渗透破坏通道，孔隙空间大幅度增加，渗透系数也出现突增现象，水力梯度则随之减小。由此可见，试件产生渗透破坏后，其渗透性出现较大程度的损伤（渗透性增加）。



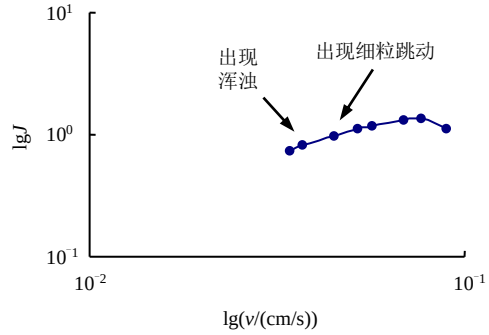
(a) 试样 1−1



(b) 试样 1−2



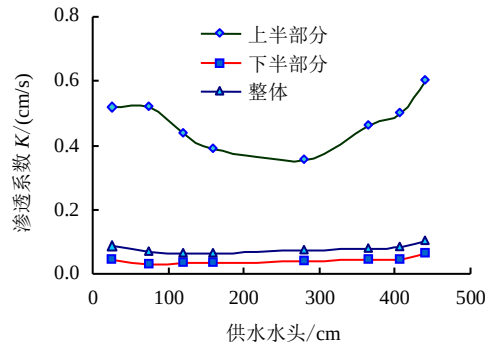
(c) 试样 1−3



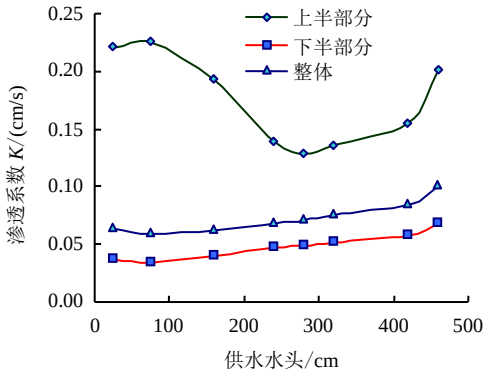
(d) 试样 1−4

图 4 lg$J$-lg$v$ 变化曲线

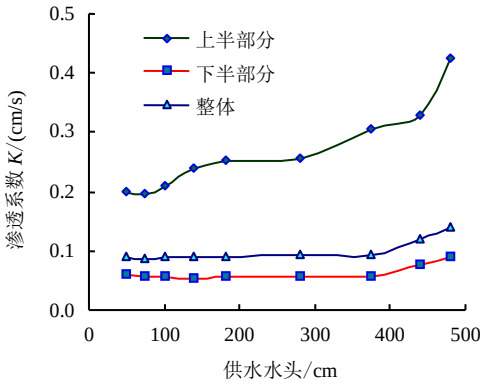
Fig.4 Curves of lg$J$-lg$v$



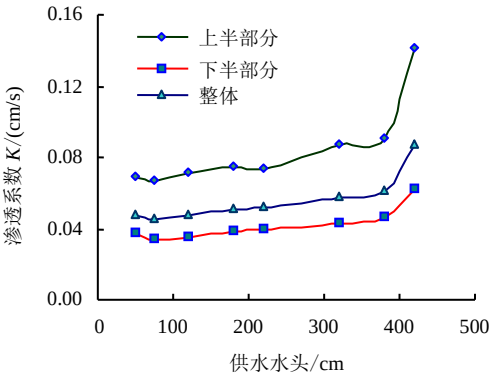
(a) 试样 1−1



(b) 试样 1−2



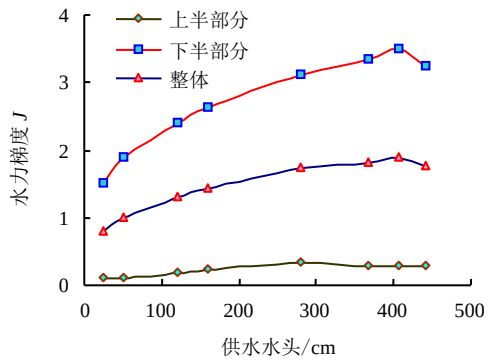
(c) 试样 1−3



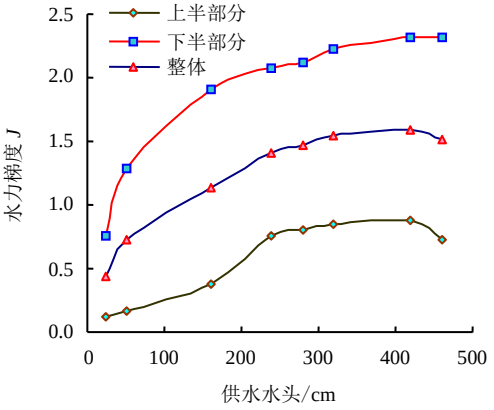
(d) 试样 1−4

图 5 渗透系数−水头变化过程曲线

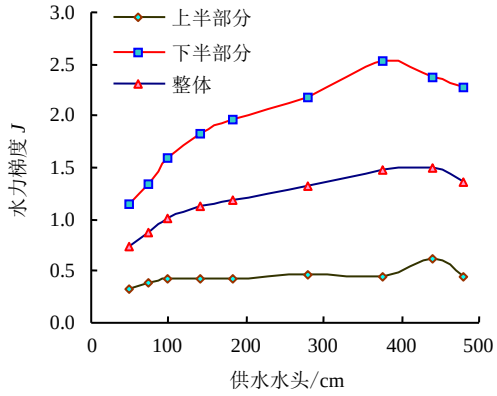
Fig.5 Variation processes of coefficient of permeability vs. water head



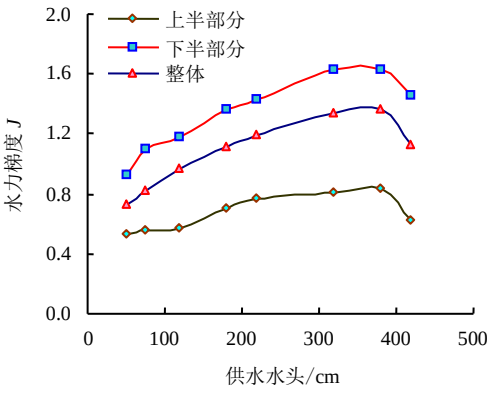
(a) 试样 1−1



(b) 试样 1−2



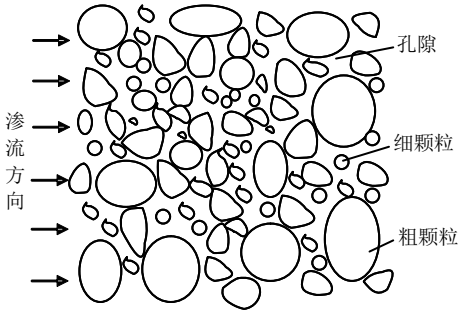
(c) 试样 1−3



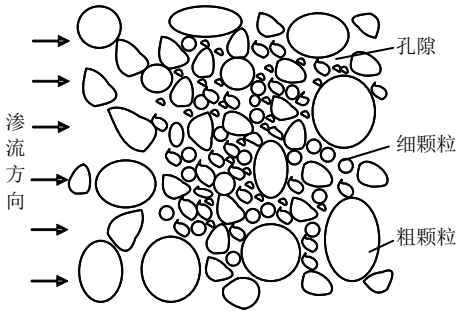
(d) 试样 1−4

图 6　水力梯度−水头变化过程曲线

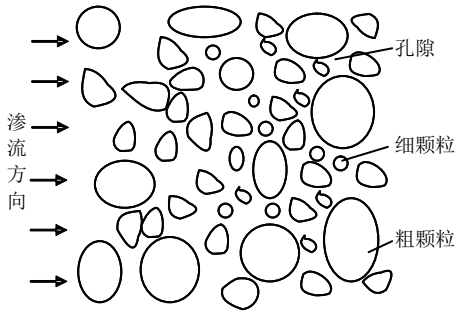
Fig.6　Variation processes of hydraulic gradient vs. water head



(a) 试验开始前



(b) 试验过程初期



(c) 试验过程后期

图 7　渗透挤密概念示意图[4]

Fig.7　Schematic diagram for seepage extrusion[4]

而图 5(a)、5(b)曲线和图 5(c)、5(d)曲线上半部分渗透系数变化情况稍有差别。这是因为当细颗粒含量少（试件 1−1 和 1−2，即图 5(a)、5(b)）时，试件上半部分的孔隙空间较大，细颗粒由上游（试件下部）迁移到下游（试件上部）时受到的阻力相对较小，容易在下游部位停留、阻塞形成渗透挤密区，使得上半部分渗透系数减小；细颗粒含量较多（试件 1−3、1−4）时，试件上半部分孔隙空间较小，细颗粒迁移相对困难，渗透挤密效应相对较弱。

图 8 为孔隙比−试验水头(e-h)变化关系曲线，其中孔隙比 e 为试样的整体孔隙比。4 种试样的孔隙比都随供水水头增大而增大，且在接近破坏时孔隙比会突然急剧增大；随后孔隙比略有减小，其可能原因是试件产生渗透破坏后，试件结构出现颗粒重构。

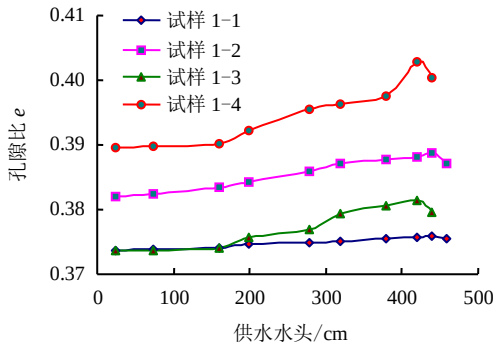


图 8 孔隙比-水头变化特征曲线

Fig.8 The variation characteristic curves of void ratio vs. water head

3.3 压缩性损伤

表 2 为渗透试验前和渗透破坏后侧限压缩试验得到的压缩模量。压缩模量由压缩系数换算得到。压缩系数取试验荷载为 100～200 kPa 时的变形进行计算。试件 1-1 的制样密度最大、试件 1-4 的制样密度最小。由表可知，压缩模量随细颗粒含量增多而减小。渗透变形试验前压缩模量在 18～21 MPa 之间变化，渗透变形试验后的压缩模量出现较大程度的降低。试件 1-1 的砂砾石土压缩模量渗透破坏后的压缩模量降低了 10%；试件 1-4 的砂砾石土压缩模量渗透破坏后的压缩模量降低了 26%。试样中粗粒含量越多（试件 1-1），渗透破坏引起的压缩性损伤越小；试样中粗粒含量越少（试件 1-4），渗透破坏引起的压缩性损伤越大。

表 2 压缩模量统计表

Table 2 The statistics chart of compression modulus

试样编号	压缩模量/MPa		差值	百分比
	试验前	试验后	/MPa	/%
1-1	20.16	18.18	1.98	10
1-2	19.79	17.56	2.23	11
1-3	18.75	14.99	3.76	20
1-4	18.62	13.69	4.93	26

4 结 论

砂砾石土地基在渗流作用下产生渗透变形，细小颗粒从土体的内部被携带出来，从而影响土体颗粒结构组成，改变力学参数，形成渗透损伤。渗透损伤过程可以分为渗透性损伤和骨架力学损伤过程。研究结论如下：

（1）渗透损伤过程是从颗粒出现迁移开始，直到试样破坏结束。孔隙比和渗透系数的增大是试样土体结构损伤的结果。

（2）试样渗流作用前后压缩模量的变化可以定量描述砂砾石土体渗透变形引起的骨架渗透损伤。

参 考 文 献

[1] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
LIU JIe. Seepage control of earth-rock dams theoretical basis[M]. BeiJing: China Water & Power Press, 2005.

[2] BONELLI STEPHANE, BRIVOIS OLIVIER, BORGHI ROLAND. Observation, analysis and modeling in complex fluid media on the modeling of piping erosion[J]. **C.R. Mecanique**, 2006, 334: 555－559.

[3] INDRARATNA BUDDHIMA, NGUYEN VO TRONG, RUJIKIATKAMJORN CHOLACHAT. Assessing the potential of internal erosion and suffusion of granular soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(5): 550－554.

[4] 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 Zhong-ming, WANG Wei, FENG Shu-rong, et al. Experimental study on the relevance between stress state seepage failure of sandy-gravel soil[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2013, 44(12): 1498－1505.

[5] 蒋中明, 王为, 冯树荣, 等. 应力状态下含黏粗粒土渗透变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 98－104.
JIANG Zhong-ming, WANG Wei, FENG Shu-rong, et al. Experimental study on influence of stress state on seepage failure characteristics of coarse grained soil with cohesive particles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(1): 98－104.

[6] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 堤基渗流管涌发展的理论分析[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 46－50.
MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Theoretical analysis on piping development of levee foundation[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, 35(12): 46－50.

[7] FOX G A, CHU-AGOR M L, CANCIENNE R M, et al. Seepage erosion mechanisms of bank collapse: Three-dimensional seepage particle mobilization and undercutting[C]//World Environmental and Water Resources Congress. [S. l.]: Ahupua'a, ASCE, 2008: 1－10.

下转第 1336 页