文章编号:1673-9469(2021)02-0019-05

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.02.004

# 不同粘粒含量土体管涌试验研究

尹子学<sup>1,2</sup>,陈 亮<sup>1,2\*</sup>,蔡国栋<sup>1,2</sup>,高明军<sup>1,2</sup>,万 昱<sup>1,2</sup>

(1.河海大学 岩土工程研究所,江苏 南京 210098;2.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)

摘要:为研究粘粒对土体管涌发生发展的影响以及管涌破坏后的力学性质,配置不同粘粒含量的土样,进行室内管涌试验模拟,并取破坏后的土样进行三轴压缩试验。对各土样水力梯度-流速曲线、应力应变曲线进行分析,研究结果表明:(1)含粘粒土样的临界水力梯度和开始发生管涌破坏时的水力梯度与粘粒含量呈负相关,破坏时流速与粘粒含量呈正相关。(2)管涌后的土体,土层深度越深,土体细颗粒流失量越大,土体的强度损失越大,土体应变软化趋势越不明显。(3)粘粒含量对土体细颗粒流失起到促进作用,使得管涌后含粘粒的土样强度损失更大,粘粒含量越大,这种促进作用越明显,强度损失越大。

关键词:管涌;粘粒;临界水力梯度;细颗粒流失率;峰值强度 中图分类号:TV223.4 文献标识码:A

## Research on Piping in Soils with Different Clay Particle Content

YIN Zixue<sup>1,2</sup>, CHEN Liang<sup>1,2\*</sup>, CAI Guodong<sup>1,2</sup>, GAO Mingjun<sup>1,2</sup>, WAN Yu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of clay particles on the occurrence and development of pipe gushing and the mechanical properties after the failure of pipe gushing, soil samples with different clay content were arranged to simulate indoor pipe gushing test, and the damaged soil samples were taken for triaxial compression test. The results show that:(1) There is a negative correlation between the critical hydraulic gradient of clay soils and the hydraulic gradient at the beginning of piping failure and the clay content. The velocity of destruction was positively correlated with the clay content. (2) The deeper the soil layer is, the greater the loss of fine particles, the greater the strength loss, and the less obvious the strain softening trend of the soil is. (3) The clay content promotes the loss of fine particles in soil, making the strength loss of soil samples containing clay particles greater after pipe gushing. The greater the viscosity content, the more obvious the promotion effect and the greater the strength loss.

Key words: piping; clay particle content; critical hydraulic gradient; fine particle loss rate; peak strength

在中国,约31%的堤坝损伤与管涌有关<sup>[1]</sup>。 管涌是土体渗透破坏的一种典型破坏形式,管涌 导致的土体渗透变形可能引发基坑、堤坝等建筑 物失稳<sup>[2-5]</sup>。国内外诸多学者都对管涌问题做了 大量研究。Ke<sup>[6]</sup>等研究了土体初始细颗粒含量和 土体临界水力梯度的关系,发现细颗粒含量越高, 临界水力梯度越大,同时研究发现土体渗透破坏 后土体强度发生明显弱化。Moffat<sup>[7-8]</sup>等研究发现 外部施加轴向荷载时,土体的细颗粒流失会受到 影响,土体渗透变形中轴向位移的大小受轴向荷 载影响;改变土体中细颗粒部分的级配,可能会影 响土体的渗透变形特性。陈亮等<sup>[9]</sup>进行了非稳定 流下管涌发生发展的试验和理论研究,提出稳定 流作用下土体的破坏水头高于非稳定流作用下土

收稿日期:2020-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778210)

作者简介:尹子学(1998-),男,河北廊坊人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。

<sup>\*</sup> 通讯作者:陈亮(1976-),男,江苏徐州人,博士,教授,主要从事岩土渗流理论和测试方面的研究。

体的破坏水头的假想。何健健<sup>[10]</sup>等通过剃除法进 行砂土管涌后的力学特性弱化规律研究,并从细 颗粒流失量的角度出发,建立了修正的 Duncan-Chang 模型。袁涛<sup>[11]</sup>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。

值得一提的是,防洪堤、防波堤等建筑的堤基 土往往是粗粒与细粒共存、级配不连续的砂-粘土 混合物<sup>[12]</sup>,因此有必要研究粘粒含量对管涌发生 发展的影响。此外,管涌具有一定的空间结构性 特点。土体发生管涌后,掌握不同深度土体的水 力条件、细颗粒流失、力学特性变化情况,对制定 针对性的修复方案具有重要的意义。本研究利用 自行研制的管涌试验仪器通过向上管涌的方法对 不同粘粒含量的土体进行了管涌试验。然后分别 取发生管涌后的上、中、下层土体进行颗粒分析, 之后按照颗粒分析结果进行重新配样并开展三轴 压缩试验(CU),分析不同粘粒含量试样管涌后上、 中、下层土体的应力-应变曲线、峰值强度差异。

## 1 室内管涌试验

## 1.1 试验装置

试验装置结构为一维竖向渗流装置如图 1(a) 所示,主体部分为竖直有机玻璃圆筒,其内径为 150 mm,高度为 430 mm。竖直圆筒上部周围采用 透明有机玻璃设置一道溢流槽。竖直圆筒侧面从 上到下依次设置 1、2、3 号测压孔,用以测量不同高 度位置土体的孔压。隔砂透水板的下部为高度 100 mm 的水流缓冲区,隔砂透水板上部 240 mm 高度的空间为试样装填区。按空间结构将试验土体分为上、中、下三层,如图1(b)所示。由于试验为竖直向上渗流,因此本文所定义的上层、中层、下层土体,若按照渗径方向划分,则分别对应下游、中游、上游土体。

## 1.2 试验材料

Richards 等<sup>[13]</sup>在研究中指出,管涌往往发生 于缺级配砾类土中。Kenney 等<sup>[14]</sup>研究发现,对于 缺级配土,如果细颗粒粒径小于*d*,粒径介于*d*与 4*d*之间的颗粒含量很小,细颗粒可以在粗颗粒构成 的骨架中移动,即土体可以发生管涌。根据这一结 论,试验材料为粗颗粒和细颗粒组成的缺级配砾类 土,其中粗颗粒为粒径 2~6 mm 的细砾;细颗粒包括 砂颗 粒 和 粘 粒 两 部 分, 砂 颗 粒 为 粒 径 0.075 ~ 0.25 mm 的细砂,粘粒为粒径 0.001~0.005 mm 的 高岭土。试验材料相关物理参数见表 1。各组试样 的颗粒级配如图 2 所示。

### 1.3 试验步骤

(1)试样制备:根据预设的细颗粒含量和填筑 密度称取粗颗粒和细颗粒干重。先将细砂与粘粒 混合均匀,然后再与粗颗粒进行混合搅拌,得到三 等份搅拌均匀的土样(无粘粒试样略去细砂与粘 粒搅拌的步骤)。

(2)装样:得到三等份土样后,按照图1(b)中 所示,依次填装下中上三个土层。装填时分层装 填击实,使土样装填均匀。

(3)试样饱和:装样结束后,采用低水头饱和 的方法,缓缓提升上游水头对试样进行饱和直至 试样中的水位刚好超过试样上表面,有少量水从 试样顶部溢出,此时将上游水水头固定,对试样饱





表 1 试样物理参数 Tab. 1 Physical parameters of the sample

试样编号	细颗粒含量 $C_{\rm f}$ /%	$e_{_{ m max}}$	$e_{ m min}$	相对密实度 $D_r$	粘粒含量 $C_{\rm e}$ /%	比重
CCO	15	0.66	0.34	0.5	0	2.68
CC10	15	0.66	0.34	0.5	10	2.68
CC15	15	0.66	0.33	0.5	15	2.68
CC20	15	0.66	0.33	0.5	20	2.68
CC25	15	0.67	0.32	0.5	25	2.68

注:表中细颗粒含量( $C_{f}$ )是指细颗粒占全部试样的质量分数,本文所述的粘粒含量( $C_{c}$ )是指粘粒占细颗粒( $C_{f}$ )的质量分数。



和 24 h 后再继续试验。

(4)管涌试验:按照每级 2.5 cm 的高度分级 提升上游水头,每级水头停留 10 min,当土体出现 细颗粒流失时,待细颗粒停止流失时再提升水头。 重复上述步骤,当试样流量出现大幅增加且土体 出现大量细颗粒流失后,根据试验情况再继续提 升几级水头,随后停止试验。

(5)细颗粒流失量统计:试验结束后分层取 样,烘干后进行颗粒筛分并称量得到各层砂颗粒 流失量及粘粒流失量。

(6)管涌后三轴压缩试验:按步骤(5)的颗粒 筛分结果重新配样并进行固结不排水三轴压缩 试验。

## 2 管涌试验结果分析

## 2.1 水力梯度与流速变化

随着上游水头的抬升,几组试样流速前期随 着水力梯度的变大而变大;达到临界水力梯度后, 曲线斜率先变小后变大,对应颗粒起动的过程,此 时管涌已经发生<sup>[15]</sup>。试验过程中不同粘粒含量土 体流速随水力梯度变化情况如图 3 所示。



图 3 不同粘粒含量土体流速随水力梯度变化情况 Fig. 3 The velocity of soil varies with hydraulic gradient under different clay content

各组土体临界水力梯度及流速和细颗粒涌出 时的水力梯度及流速如表2所示。管涌时,土体的 粘粒含量越大,试样的临界水力梯度越小,细颗粒 涌出时的水力梯度越小,流速越大。

表 2 不同节点水力梯度和流速

Tab. 2 Hydraulic gradient and velocity at different nodes

粘粒含量	临界水	临界流速	细颗粒涌出	细颗粒涌出时
$C_{\rm c}/\%$	力梯度	$/(\mathrm{cm}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{s}^{\text{-1}})$	时水力梯度	流速/(cm•s <sup>-1</sup> )
0	0.57	0.029 1	1.40	0.032 2
10	0.42	0.026 2	1.22	0.037 5
15	0.37	0.028 3	1.13	0.0599
20	0.27	0.036 0	0.95	0.078 7
25	0.19	0.026 1	0.76	0.089 3

#### 2.2 细颗粒流失量

由图 4 可得,试样的细颗粒流失量呈现明显的 空间结构性特点:细颗粒流失量沿着试验渗径方 向逐渐变小,下层流失量最大,上层流失量最小。 例如粘粒含量为 25%时,试样中、下层的细砂流失 百分比分别为 17.5%、31%,而试样上层的细砂流 失百分比只有 4.25%。整个试样的细颗粒流失量





与中层的细颗粒流失量相接近。

从粘粒含量的角度看,粘粒含量的增加使得整个试样的砂颗粒流失量和粘粒流失量都随之增加。可见,粘粒对土体的细颗粒流失起到一种促进作用,粘粒更容易随渗透水流移动,携带粘粒的渗透水流对细颗粒产生一定冲击,粘粒也可能起到类似滚珠的作用,使细颗粒更容易在孔隙中移动。增加粘粒含量时,粘粒的促进作用增强。

## 3 管涌后的剪切试验结果分析

不同粘粒含量的各层试样应力应变曲线如图 5 所示。当轴向应变小于 1.5% 时,各条曲线几乎 重合,剪应力随轴向应变增加速度较快;轴向应变 大于 3%时,各条曲线之间的距离逐渐拉开,曲线 的斜率变化出现一定差异。各组出现峰值强度的 应变区间在 6.2%~7%之间,可见粘粒含量对试样 达到峰值强度时的轴向应变无明显影响。随着粘 粒含量增加,各层土体峰值强度均有降低趋势。 此外管涌后土体的变形性质存在一定的空间结构 性特点。渗透破坏后上层土体应变软化趋势与初 始试样接近,应变软化削弱程度较低;渗透破坏后 中、下层土体应变软化。削弱趋势较明显。由此 可见,土层深度越深,砾类土的应变软化趋势越容 易受到削弱。



Fig. 5 Stress-strain curves of soils with different clay particle content

根据图 5,得到不同粘粒含量下的各层土体峰 值强度变化曲线如图 6。初始试样是未经管涌破 坏的试样,各组峰值强度分别为432、420、415、 406、396 kPa。较 $C_{c}$ =0%,粘粒组峰值强度降低幅 度分别为 2.78%、3.94%、6.01%、8.33%,出现峰 值强度的变化是因为在细颗粒含量不变的情况 下,粘粒替代了一定质量的细砂颗粒,可见即使不 发生管涌,粘粒含量的增加也会使得土体峰值强 度降低。下层土体是管涌破坏最严重的土样,其 各组峰值强度分别为 399、377、370、335、319 kPa, 较 $C_{a}$  = 0%峰值强度降低幅度分别为 5.51%、 7.26%、16.04%、20.05%。相比于初始试样,发生 管涌后,粘粒含量越大,土体峰值强度下降幅度越 大。这进一步证实了粘粒对土样的细颗粒流失起 一定的促进作用。粘粒含量越大,这种促进作用 则越明显。



图 6 不同粘粒含量下峰值强度曲线 Fig. 6 Peak strength curves of different clay contents

土体峰值强度随土层深度的增加而降低,是 由于土体的渗透变形程度随土层深度增加而增 加。由于细颗粒流失百分比与土层深度正相关。 土层深度越深,细颗粒流失越严重,孔隙体积增加 越大,土体结构越松散,导致土体渗透变形越严 重,对整个土体的强度损失影响越大。

## 4 结论

 1)含粘粒土样的临界水力梯度和开始发生管 涌破坏时的水力梯度与粘粒含量呈负相关。破坏
 时流速与粘粒含量呈正相关。

2) 管涌后的土体, 土层深度越深, 土体细颗粒 流失量越大, 土体的强度损失越大, 土体应变软化 趋势越不明显。

3)粘粒含量对土体细颗粒流失起到促进作用,

使得管涌后含粘粒的土样强度损失更大。粘粒含量 越大,这种促进作用越明显,强度损失越大。

## 参考文献:

- [1] ZHANG L M, XU Y, JIA J S, et al. Diagnosis of Embankment Dam Distresses Using Bayesian Networks: Part I. Global-level Characteristics Based on a Dam Distress Database[J]. Can Geotech J, 2011, 48(11):1630-1644.
- [2] MILLIGAN V. Some Uncertainties in Embankment Dam Engineering [J]. J Geotech Geoev Eng ASCE, 2003, 129 (9):785-797.
- [3] ZHANG L M, CHEN Q. Analysis of Seepage Failure of the Gouhou Rockfifill Dam during Reservoir Water Infifiltration
   [J]. Soils Found, 2006, 46(5):557-568.
- [4] FELL R, WAN C, FOSTER M. Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams [J]. Geotech. Geoenviron, 2003, 129(4):307-314.
- [5]XU Y, ZHANG L M. Breaching Parameters of Earth and Rock-fifill Damsr [J]. Geotech. Geoenviron, 2009, 135 (12):1957-1970.
- [6] KE L, TAKAHASHI A. Strength Reduction of Cohesionless Soil Due to Internal Erosioninduced by One-dimensional Upward Seepage Flow[J]. Soils and foundations, 2012, 52 (4):698-711.
- MOFFAT R, FANNIN R J, GARNER S J. Spatial and Temporal Progression of Internal Erosion in Cohesionless Soil
   [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(3): 399-412.
- [8] MOFFAT R, FANNIN R J. A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(4):273-279.
- [9]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.
- [10]何健健.无粘性土管涌力学性质研究[D].南京:河海 大学,2018.
- [11] 袁涛,蒋中明,刘德谦,等. 粗粒土渗透损伤特性试验 研究[J]. 岩土力学,2018,39(4):1311-1316.
- [12]吴子龙,朱向阳,邓永锋,等.砂-黏土混合物的压缩性 状及其粗颗粒骨架形成机制[J].土木工程学报, 2016,49(02):121-128.
- [13] RICHARDS K S, REDDY K R. Critical Appraisal of Piping Phenomena in Earth Dams[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2007, 66(4):381-402.
- [14] KENNEY T C, LAU D. Internal Stability of Granular Filters [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22 (2): 215-225.
- [15] NGUYEN H H, MAROT D, BENDAHMANE F. Erodibility Characterisation for Suffusion Process in Cohesive Soil by Two Types of Hydraulic Loading [J]. La Houille Blanche, 2012(6):54-60.

(责任编辑 王利君)