文章编号：1673-9469（2019）02-0001-04 doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.001

不同细颗粒含量土体管涌三轴试验研究

陈 亮[1,2]，张 哲[1,2]，陈 成[1,2]，余 旺[1,2]

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点试验室，江苏 南京 210098；2. 河海大学岩土工程科学研究所，江苏 南京 210098)

摘要：为探究不同细颗粒含量土体管涌机理以及管涌后土体力学性质，选取三种不同细颗粒含量的土体，利用自行研制的管涌三轴仪选择向上管涌的方法模拟管涌实际。通过管涌试验以及管涌后的排水剪切试验，分析了细颗粒含量对临界水力梯度、累计涌砂量、峰值强度以及体变的影响。结果表明：管涌发生前，临界水力梯度和临界流速随细颗粒含量的增加而增加；土体在较高的同一水力梯度作用下，累计涌砂量增长速度随时间逐渐减小，流失相同的细颗粒含量，累计涌砂的时间随细颗粒含量的增加而减小；随着细颗粒含量的增大，管涌后土体峰值强度呈不规则变化，土体体积先发生剪缩后发生剪胀，试样体积最大剪缩量随细颗粒含量的增大而增大。

关键词：细颗粒含量；临界水力梯度；累计涌砂量；力学性质

中图分类号：TV223.4 **文献标识码**：A

Research on Piping and Triaxial Test in Soils with Different Fine Particle Content

CHEN Liang[1,2]，ZHANG Zhe[1,2]，CHEN Cheng[1,2]，YU Wang[1,2]

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

Abstract：In order to explore the piping mechanism and the mechanical properties after piping of soils with different fine particle content，three kinds of soils with different fine particle content were selected and piping up was simulated by self-developed piping triaxial apparatus. Through piping test and drainage shear test after piping，the effects of fine particle content on critical hydraulic gradient，cumulative sand inflow，peak strength and volume change were analyzed. The results show that the critical hydraulic gradient and critical flow velocity increase with the increase of fine particle content before piping. The growth rate of cumulative sand inflow decreases with time under the action of higher hydraulic gradient. The cumulative time of sand gushing decreases with the increase of fine particle content when the same fine particle content is lost. With the increase of fine particle content，the peak strength of soil changes irregularly after piping，the volume of soil first shears and then dilates，and the maximum volume shrinkage of sample increases with the increase of fine particle content.

Key words：fine particle content；critical hydraulic gradient；accumulated sand inflow；mechanical properties

管涌是堤坝渗透破坏最常见的形式。管涌的发展过程具有很高的随机性和隐蔽性。一旦管涌发生，大量细颗粒从土体内部流失，从而形成渗漏通道，土体强度和稳定性降低，土体失稳引起堤基塌陷或沉降。很多学者从水力条件如渗流方向、水头形式等出发，结合物理条件如孔隙、密实度等和几何条件如粒径比、颗粒级配等，对管涌问题做了大量的研究[1-4]。也有学者开始研究不同应力状态下

收稿日期：2019-01-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (51778210)
作者简介：陈亮 (1976-)，男，江苏徐州人，博士，教授，从事岩土渗流理论与测试方面的研究。

管涌的发生发展过程以及土体管涌后力学性质的弱化规律。罗玉龙等 [5-6] 研制了渗流 - 侵蚀 - 应力耦合管涌试验装置，研究了不同应力状态下的管涌发生发展过程，并提出了渗流 - 侵蚀 - 应力耦合的管涌机理。D.S.Chang 等 [7-9] 研制了用于研究复杂应力条件下管涌发生发展过程的管涌三轴仪，研究了不同剪应力比条件下临界水力梯度变化规律，并通过盐溶解法研究了细颗粒流失对土体力学性质的影响。Lin Ke[10-11] 等采用向下的渗流方向研究了土体管涌前后强度的变化规律以及不同细颗粒含量土体管涌前后的不排水剪切强度。吴梦喜等 [12] 通过剔除土中细颗粒的含量来模拟土体在渗流作用下细颗粒流失的现象，并通过对不同颗粒流失量的土体进行三轴试验和侧限压缩试验来研究细颗粒流失对土体力学性质的影响。何健健 [13] 通过细颗粒剔除法来模拟细颗粒流失量，对土体在不同围压、密实度以及细颗粒流失量条件下进行了管涌后的排水剪切试验和不排水剪切试验。

为了更好的模拟管涌实际，本研究利用自行研制的管涌三轴仪在渗流 - 侵蚀 - 应力耦合条件下通过直接向上管涌的方法先对不同细颗粒含量土体进行管涌试验，研究管涌发生发展过程，然后对管涌后流失相同细颗粒比例的土体进行排水剪切试验，研究不同细颗粒含量条件下土体管涌后强度特征的差异。相关成果可为今后进一步开展管涌问题的研究提供依据。

1 试验内容

1.1 试验装置

为了在不同的应力状态下进行管涌试验以及对管涌后的土体进行三轴压缩试验，自行设计了图 1 所示的试验装置。该试验装置由围压和反压控制系统、轴向压力控制系统、渗透控制系统、细颗粒收集系统以及数据采集系统组成。

图 1 土体管涌三轴试验装置

Fig.1 Triaxial test device for soil piping

围压和反压控制系统产生的高压水通过管路与压力室底座连接，围压控制器可以实现对放置在压力室内的试样实现三向等压加压，通过反压控制器可以实现试样的饱和以及体变的量测；轴向传力杆一端与轴向力传感器相连，另一端与试样帽接触，通过轴向位移的变化向试样施加轴向力；渗透控制系统通过改变水头的高低向试样施加不同的水力梯度；细颗粒收集系统能够收集管涌过程中流出的细颗粒并实时测量累计流出的细颗粒质量；数据采集系统能够实时监测并收集实验过程中的轴向应变、偏应力、体变以及孔隙水压力等数据。

1.2 试验材料

T. C. Kenney[14] 等提出对于间断级配土，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，那么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。根据上述研究结果，选用的试验材料为长江黄砂，其基本物理参数为：细颗粒粒径 0.075 ～ 0.25 mm，土粒比重 2.64；粗颗粒粒径 2.0 ～ 5.0 mm，土粒比重 2.63。为研究不同细颗粒含量的土体管涌发生发展过程以及管涌后强度特征的差异，试验选用了 3 种不同细颗粒含量的混合土样，细颗粒含量分别取 15%、25% 以及 35%，颗粒分析曲线如图 2 所示。

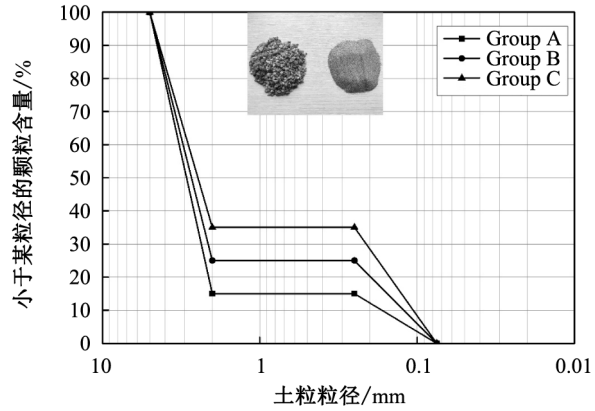


图 2 不同细颗粒含量土的级配曲线

Fig.2 Gradation curves of soils with different fine particle contents

1.3 试验步骤

(1) 试样制备和安装。三组试样的密实度全部取 60%，通过密实度试验计算出每一组试样的粗细颗

粒质量，然后混入 5% 干土质量的水，搅拌均匀。每一组试样的直径是 150 mm，高度是 300 mm，首先将橡皮膜固定在试样底座，套上对开膜，然后将混合均匀的土样采用 Ladd[15] 提出的欠压实的方式分 10 层装填，每一层的高度是 30 mm。装填好的试样如图 3 所示。

(2) 试样饱和和固结。试验采用水头饱和和反压饱和两种方式对试样进行饱和，饱和完成后施加 50 kPa 的围压对试样进行固结。

(3) 管涌试验。逐级增加上游水箱的水头高度，当 i<1 时，水力梯度值每 30 min 增加 0.2；当 i≥1 时，水力梯度值每 30 min 增加 0.1。当有细颗粒流出时，将水头高度直接提升到较大值。实验过程中记录流量和累计涌砂量的值，当累计涌砂量达到细颗粒含量的 30% 时停止管涌试验。

(4) 管涌后的排水剪切试验。实验过程中保持围压 50 kpa 不变，剪切速率设 0.1%/min，土体应力应变以及体变情况可以通过数据采集系统实时记录下来，数据记录间隔时长为 60 s。

图 3 安装好的试样
Fig.3 Installed specimens

2 管涌试验结果分析

2.1 临界水力梯度

随着上游水头的抬升，三组试样的流速随着水力梯度的变大而变大，如图 4 所示。当水力梯度值为 0.5 时，细颗粒含量为 15% 的 A 组土体流速为 0.025 cm/s；细颗粒含量为 25% 的 B 组土体流速为 0.015 cm/s；细颗粒含量为 35% 的 C 组土体流速为 0.010 cm/s。随着水力梯度的增加，三组试样的流速基本呈线性增长，并且细颗粒含量越少，流速越大。

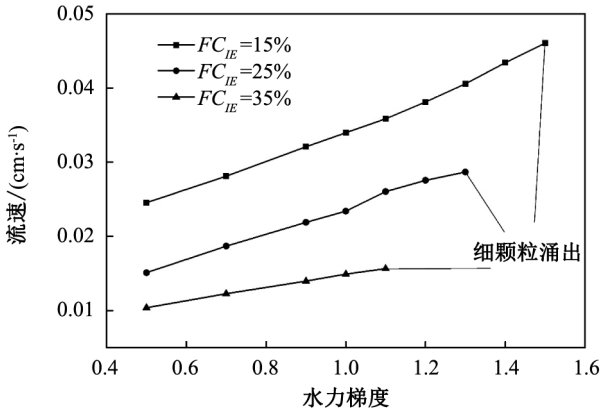


图 4 不同细颗粒含量土体流速随水力梯度变化情况
Fig.4 Variation of soil flow velocity with hydraulic gradient with different fine particle content

当水力梯度增加到 1.1 时，C 组试样有细颗粒涌出；当水力梯度增加到 1.3 时，B 组试样有细颗粒涌出；当水力梯度增加到 1.5 时，A 组试样有细颗粒涌出。A、B、C 三组试样的临界水力梯度和临界流速分别为 1.5、1.3、1.1 以及 0.046 cm/s、0.028 cm/s、0.015 cm/s。当土体发生管涌时，土体中细颗粒含量越大，临界水力梯度反而越小，临界流速也越小，临界水力梯度和临界流速呈负相关的关系，如图 5 所示。

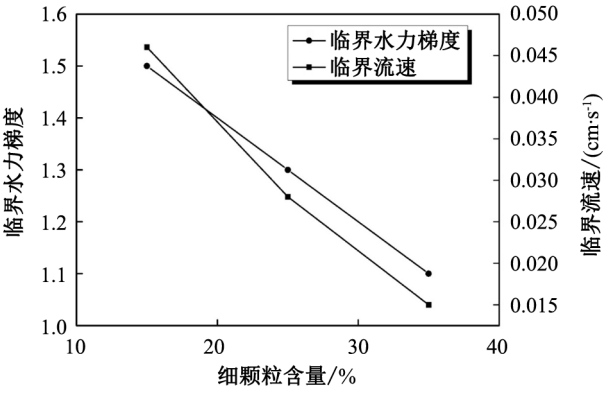


图 5 临界水力梯度和流速随细颗粒含量变化情况
Fig.5 Variation of critical hydraulic gradient and flow velocity with fine particle content

2.2 累计涌砂量

当把水箱提升到较高处时，土体中的细颗粒在较高的同一水力梯度作用下持续涌出，累计涌砂量随时间不断增长，如图 6 所示。刚开始三组试样累计涌砂量急剧增长，在 5 分钟的时间里 A、B、C 三组试样的累计涌砂量高达 86 g、215 g 以及 472 g，随着时间的增长，累计涌砂量的增长速度逐渐减

小。在相同的时间段内，累计涌砂量随细颗粒含量的增加而增加，在累计涌砂时间为 100 min 时，A、B、C 三组试样的累计涌砂量分别为 250 g、520 g、960 g。当三组试样的累计涌砂量达到细颗粒含量的 30% 时，A、B、C 三组试样所用的时间分别为 671 min、260 min 以及 122 min，累计涌砂的时间随细颗粒含量的增加而减小。

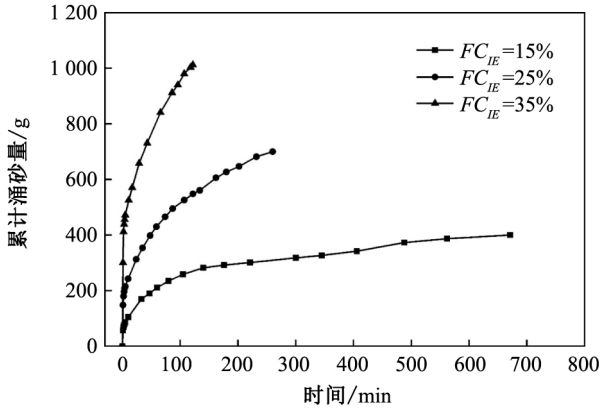


图 6 累计涌砂量随时间的变化情况

Fig.6 The accumulated sand gushing volume with the change of time

3 管涌后的剪切试验结果分析

对管涌后的土体进行三轴压缩试验，三组试样的应力 - 应变关系和体变 - 轴向应变关系如图 7 所示。A 组实验的峰值强度 171 kPa 出现在轴向应变为 8.8% 处，B 组实验的峰值强度 185 kPa 出现在轴向应变为 11.9% 处，C 组试验的峰值强度 172 kPa 出现在轴向应变为 15% 处，三组试验中，B 组峰值强度最大，A 组和 C 组峰值强度几乎相等。由此可见随着细颗粒含量的增大，峰值强度并不会线性变化，如图 8 所示，这与管涌改变了土体内部结构有关。

随着轴向应变的增大，试样体积先减小后增大，A、B、C 三组试样的最大体积减小量分别为 0.53%、0.94% 以及 1.24%，对应的轴向应变分别为 2.8%、4.9% 以及 6.9%。由此可见，管涌后的土体在三轴剪切状态下体积先发生剪缩后发生剪胀，试样体积最大剪缩量随细颗粒含量的增大而增大。

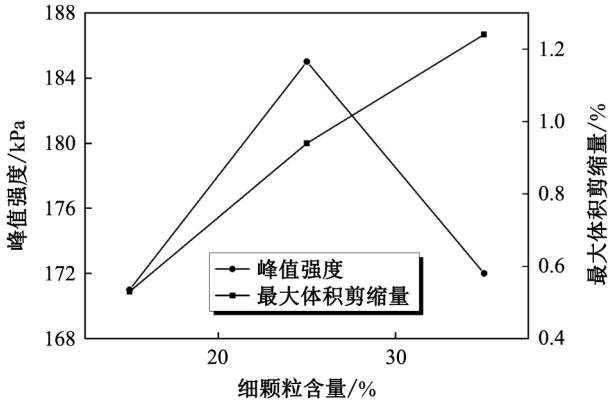


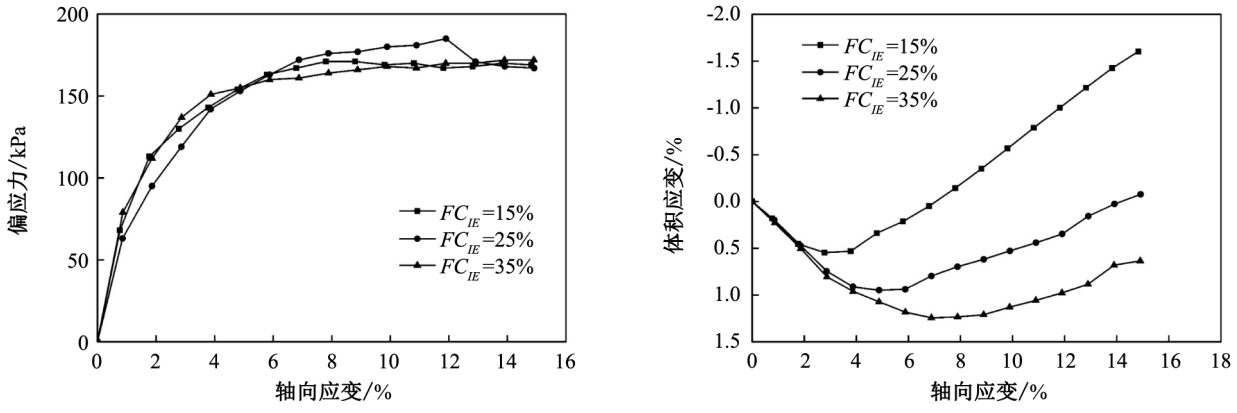
图 8 峰值强度和最大体积剪缩量与细颗粒含量的关系

Fig.8 Relationship between peak strength and maximum volume shear and fine particle content

4 结论

1) 管涌发生前，土体中水的流速随水力梯度的增加呈线性增长，并随细颗粒含量的增加而减小。临界水力梯度和临界流速与细颗粒含量呈负相关的关系，随着细颗粒含量的增加，临界水力梯度和流速反而减小。

2) 土体在较高的同一水力梯度作用下，随着时间的增长，累计涌砂量的增长速度逐渐减小。在相同的时间段内，累计涌砂量随细颗粒含量的增加而增加；流失相同的细颗粒含量，累计涌砂的时间随



(a) 应力应变曲线图 (b) 体变 - 轴向应变图

图 7 应力 - 应变关系和体变 - 轴向应变关系

Fig.7 Stress-strain relationship and volumetric-axial strain relationship

（下转第 37 页）

3) 随着颗粒含量的增加，材料的弹性模量线性增大，泊松比线性减小。

参考文献：

[1]PENG Bo，YU Wenbin.A micromechanics theory for homogenization and dehomogenization of aperiodic heterogeneous materials[J].Composite Structures，2018，199：53-62.

[2]XIA Z H，ZHANG Y F，ELLYIN F，A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications. International Journal of Solids and Structures[J].2003，40(8)：1907-1921.

[3]AL-OSTAZ A，ANIPINDI D，KHALID I A. Statistical model for characterizing random microstructure of inclusion-matrix composites. Journal of Materials Science[J].2007，42(16)：7016-7030.

[4]MENG Q X，WANG H L，XU W Y et al，A numerical homogenization study of the elastic property of a soil-rock mixture using random mesostructure generation[J]. Computers&Geotechnics.2018，98(6)：48–57.

[5]MASMOUDI M，KADDOURI W，KANIT T et al.Modeling of the effect of the void shape on effective ultimate tensile strength of porous materials：numerical homogenization versus experimental results[J]. International Journal of Mechanical Sciences.2017，130：497-507.

[6] 葛 超，董永香，宋 卿 . 基于 Al/PTFE 真实细观特性统计模型的宏观力学性能模拟 [J]. 复合材料学报 .2016，33(11)：2528-2536.

(责任编辑　李新)

(上接第 4 页) 细颗粒含量的增加而减小。

3) 随着细颗粒含量的增大，由于管涌后的土体内部结构发生改变，土体峰值强度呈不规则变化。在三轴剪切状态下管涌后土体体积先发生剪缩后再发生剪胀，试样体积最大剪缩量随细颗粒含量的增大而增大。

参考文献：

[1] 常东升，张利民 . 土体渗透稳定性判定准则 [J]. 岩土力学，2011(增刊 1)：253-259.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 梁 越，陈 亮，陈建生 . 考虑流固耦合作用的管涌发展数学模型研究 [J]. 岩土工程学报，2011，33(8)：1265-1270.

[5] 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.

[6] 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.

[7]CHANG D S，ZHANG L M. A Stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. Geotechnical Testing Journal，2011，34(6)：1-11.

[8]CHANG D S，ZHANG L M，XU T H.Laboratory investigation of initiation and development of internal erosion in soils under complex stress states[J].ICSE6 Paris，2012，1(1)：895-902.

[9]CHEN C，ZHANG L M，CHANG D S.Stress-strain behavior of granular soils subjected to internal erosion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2016，142(12)：1-6.

[10]LIN K，AKIHIRO T.Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion[J]. Geotechnical Testing Journal，2014，37(2)：1-18.

[11]OUYANG M，AKIHIRO T.Influence of initial fines content on fabric of soils subjected to internal erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal，2016，53(2)：299-313.

[12] 吴梦喜，叶发明，张 琦 . 细颗粒流失对砂砾石土本构关系的影响研究 [J]. 岩土力学，2017，38(6)：1550-1556.

[13] 何健健 . 无粘性土管涌力学性质研究 [D]. 南京：河海大学，2018.

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

[15]LADD R S.Preparing test specimens using undercompaction.[J].Geotechnical Testing Journal，1978，1(1)：8.

(责任编辑　李新)