

DOI: 10.11779/CJGE2020S2029

竖向及水平向渗流作用下粉砂渗透特性研究

张灿虹^{1,3}, 钱亚俊², 钟启明², 王保田³

(1. 南京工业职业技术大学, 江苏南京 210023; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 3. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 采用自主研制的圆柱形渗流仪及水平渗流装置, 开展了粉砂竖向和水平向的渗流试验, 获取了两种渗流方向下粉砂的临界水力梯度及其渗透变形特性。在级配、密度、孔隙大小等影响因素相同的情况下, 粉砂竖向渗流的临界水力梯度比水平向高出近 44%, 水平向渗流作用一般高于竖向。基于室内试验成果, 采用离散元与计算流体力学耦合的细观力学模型, 对粉砂在竖向和水平向的渗流情况进行分析和模拟。结果表明, 粉砂的渗透变形拐点与模型试验结果吻合, 水平渗流和竖向渗流分别在水力梯度 $i=0.8$, 0.4 时出现颗粒簇的流失, 在水力梯度分别为 1.0 和 0.5 时发生整体渗透破坏。

关键词: 渗流方向; 粉砂土; 渗透试验; 流固耦合

中图分类号: TV139.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0163-05

作者简介: 张灿虹(1989—), 女, 博士, 副教授, 主要从事渗流理论与渗透变形计算分析方面的研究工作。E-mail: 2018100941@niit.edu.cn。

Permeability characteristics of silty sand under vertical and horizontal seepages

ZHANG Can-hong^{1,3}, QIAN Ya-jun², ZHONG Qi-ming², WANG Bao-tian³

(1. Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing

Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The influence of seepage direction on the silt permeability are studied. The vertical and horizontal seepage tests of silty sand are carried out by using the self-designed devices. The critical gradient and deformation characteristics of silt under two different seepage directions are obtained in the tests. When the other influencing factors such as gradation, density and pore size are the same, the vertical hydraulic gradient of horizontal seepage of silt is generally 44% higher than the critical one, and the horizontal seepage is generally higher than the vertical one. The data can be used for design of seepage control of the silt. Based on the indoor model tests, the micro-mechanical model is used to analyze and simulate the seepage behavior of the silt under vertical and horizontal directions. The hydraulic gradients of the two seepage directions calculated by numerical model are consistent with the test ones. The loss of particle clusters occurs in horizontal and vertical seepages at hydraulic gradients of 0.8 and 0.4, respectively. The research results may provide a theoretical basis for the design of seepage control in water conservancy and hydropower projects with silt layer.

Key words: seepage direction; silty sand soil; permeability test; fluid-solid coupling

0 引言

土的渗透特性是土重要的工程性质之一, 影响着土木工程的施工。目前无黏性土渗透特性的试验研究, 多是采用竖向圆柱体模型槽进行, 试验中土体受到的水流的作用方向是由下至上的竖直方向, 而对于土体承受水平向渗流时土体渗透特性的研究不多^[1], 渗流方向对土体渗流变形特性的研究还尚未给予足够重视。对土渗流的研究表明, 实际施工中渗流的优势方向往往是水平方向, 通常土体水平向的渗透性大于竖向, 而抵抗水平向渗透破坏的能力低于抵抗竖向渗透破坏的能力^[2-6]。

本文针对粉砂竖向和水平向渗透特性研究存有的不足, 利用自主设计的实验装置, 对粉砂开展竖向和水平向渗流试验, 对比分析了两种不同方向渗流场下粉砂的渗透特性。基于室内模拟试验, 建立三维离散元与计算流体力学耦合的细观力学模型, 对粉砂在竖向和水平向的渗流情况进行分析和计算。通过数值计算结果, 对竖向和水平向渗流作用下的粉砂内部接触

基金项目: 江苏省高校自然科学研究项目 (19KJB560016); 南京工业职业技术学院人才引进启动基金项目 (YK19-02-02); 国家自然科学基金青年基金项目 (51809182)

收稿日期: 2020-08-07

力、渗流速度及流场的分布规律进行细观分析, 将数值模拟与室内试验的结果进行分析、比较。

1 不同渗流方向下粉砂渗透变形室内试验模拟

1.1 试验仪器和方法

(1) 试验仪器

粉砂的竖向渗透变形试验借助实验室自主设计的圆柱形渗流试验仪进行, 该装置示意图如图 1 所示。粉砂水平向渗流渗透变形特性的研究是在自主设计的水平渗流试验装置中进行的, 见图 2。模型由进水系统, 装样区及排水系统 3 个主要部分组成。进水系统通过对进水水头高度的调节自由选择水头加载高度。

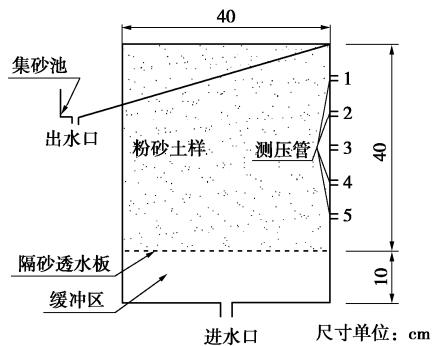


图 1 圆柱形渗流试验仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of instrument for cylindrical seepage tests

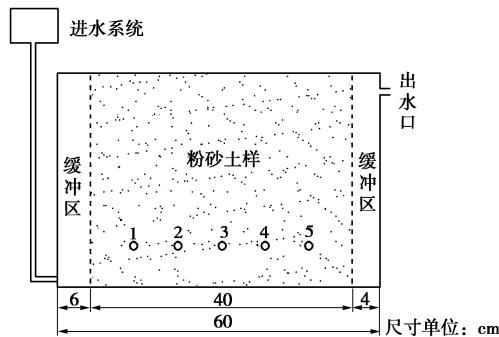


图 2 粉砂水平向渗流试验研究模型示意图

Fig. 2 Schematic of model for horizontal seepage tests

(2) 试验方法及步骤

粉砂烘干并分层装样。称样烘干 24 g 取出装样, 每 10 cm 分为一层进行装样; 排气饱和。装样完成, 分次提升水箱供水高度对试验土样进行饱和, 最后一次使水头抬升至与试样顶端齐平, 静置 24 h; 逐级调整水头进行试验。逐级抬升水头高度, 对测压管水头高度读数并记录, 同时量测渗流量大小, 记录试验进程中的渗流现象, 直至该级渗流稳定, 转入下一级水

头; 当试验过程中, 流量忽然增大, 并出现明显的渗流通道, 可以认定为试样发生渗透破坏, 不再继续加大水头高度, 试验完成。

1.2 粉砂竖向和水平向渗流试验结果分析

对粉砂在竖向渗流下的渗透流速受水力梯度影响下的变化规律进行研究, 得到渗流速度随水力梯度变化的关系曲线, 如图 3 所示。对粉砂在水平向渗流作用下的临界水力梯度进行研究, 结果如图 4 所示。

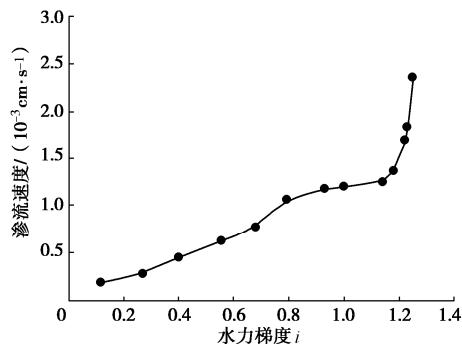


图 3 竖向渗流下渗流速度随水力梯度变化曲线

Fig. 3 Relationship between seepage velocity and vertical hydraulic gradient

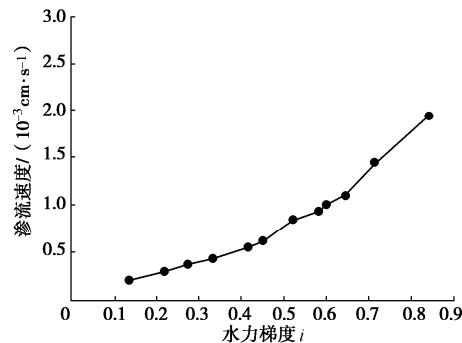


图 4 水平向渗流下渗流速度随水力梯度变化曲线

Fig. 4 Relationship between seepage velocity and critical hydraulic gradient

由图 3 得到, 在水力梯度 $i < 0.787$ 时, 渗流速度随水力梯度呈近似线性的变化, 此时土样处于渗流稳定阶段; 当水力梯度为 1.1 时, 渗流速度忽然增大, 粉砂颗粒流失量也徒增, 此时土体发生渗透变形。图 4 粉砂在水平向渗流下的变化规律显示: 水力梯度小于 0.45 时, 粉砂土渗透流速随着水力梯度的增大呈线性增长, 水流清澈, 粉砂流出较少。当水力梯度增至 0.52 时, 试样整体的流速瞬间增大, 粉砂流出量明显增多且呈持续流失状态, 此时粉砂土样内部颗粒运动不再规律, 试样开始发生渗透破坏。

表 1 给出粉砂在两种渗流方向下的渗透系数、临界坡降与破坏坡降。粉砂在竖向渗流时的临界水力梯度为 0.787, 破坏水力梯度为 1.10; 而水平向渗流中,

所能承受的临界水力梯度为 0.45。在影响因素诸如种类、级配、密度、孔隙大小等相同的情况下, 粉砂坚向渗流的临界水力梯度比水平向高出近 44%。由于土体在受到水平向渗流时, 平均渗透系数取决于最透水土层的厚度和渗透性; 而对于坚向渗流, 其平均渗透系数取决于最不透水土层的渗透性。加之, 坚向渗流中重力作用与渗流方向一致, 会产生对土层的压密作用, 使得该渗流方向下的渗透系数小于水平向, 而土体能够承受的水头高于水平向的渗流。

表 1 不同渗流方向下粉砂渗透系数、临界坡降和破坏坡降

Table 1 Data of permeability coefficient of silt, critical slope and failure slope under different seepage directions

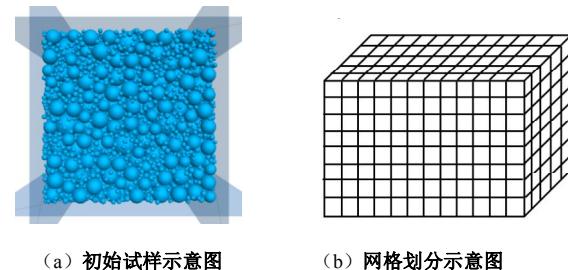
渗流方向	渗透系数 $(10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	临界水力 梯度	破坏水力 梯度
坚向	6.13	0.787	1.10
水平	6.25	0.450	0.52

2 不同渗流方向下粉砂渗透变形颗粒流模拟

对于固相颗粒, 通过求解运动和动量方程模拟颗粒运动, 采用离散元的颗粒流理论进行模拟; 对于液相介质, 采用均一化流体计算技术模拟其在孔隙中的运动, 也就是通过求解平均 Navier-Stokes 方程模拟孔隙中流体的运动^[7-9]。

2.1 数值模型

对粉砂土不同向渗流形态的模拟中, 边界条件的界定也略有不同。坚向渗流下, 颗粒周边的边界为固壁边界条件, 上下为压力边界条件。水平向渗流下, 模型的前后和上下边界为固壁边界条件, 左右设置为压力边界条件和自由边界条件。生成的土体模型如图 5 所示。



(a) 初始试样示意图

(b) 网格划分示意图

图 5 PFC^{3D} 颗粒模型及网格划分示意图

Fig. 5 PFC^{3D} particle model and mesh generation

对于坚向的渗流, 按照试验中模型, 上覆为自由边界, 没有压重。对于水平向的渗流, 试样在重力和浮力作用下保持平衡, 当作用渗流力后, 土中小颗粒将从模型右侧流出, 因此在试样右侧设置了相互交叉垂直的线墙, 如图 6 所示。

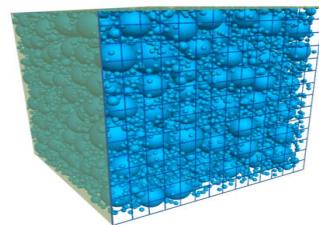


图 6 线墙示意图

Fig. 6 Schematic of line wall

2.2 数值计算流程

采用 PFC^{3D} 对流固耦合问题进行计算流程如图 7 所示。

2.3 数值模拟结果

(1) 粉砂土坚向和水平向渗流下渗透变形情况

a) 粉砂坚向渗流下的渗透变形情况

图 8 给出了粉砂在坚向渗流作用下, 土样随水力梯度的变化情况。

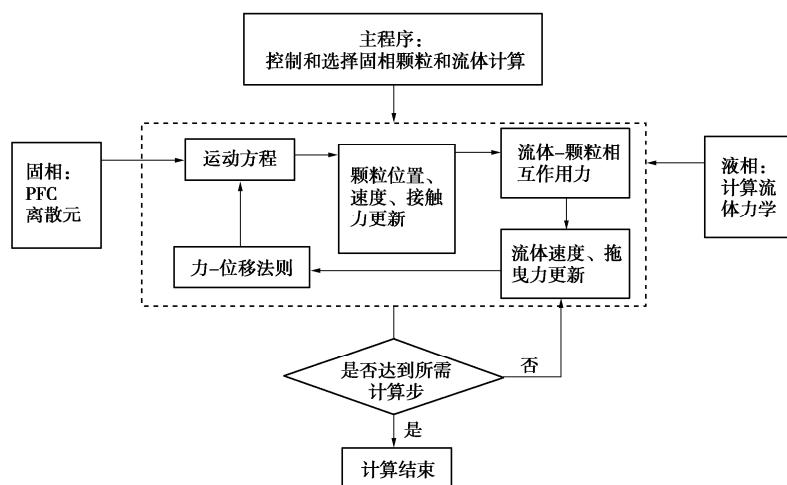


图 7 PFC^{3D} 流固耦合计算流程示意图

Fig. 7 Flow chart of PFC^{3D} flow-solid coupling calculation

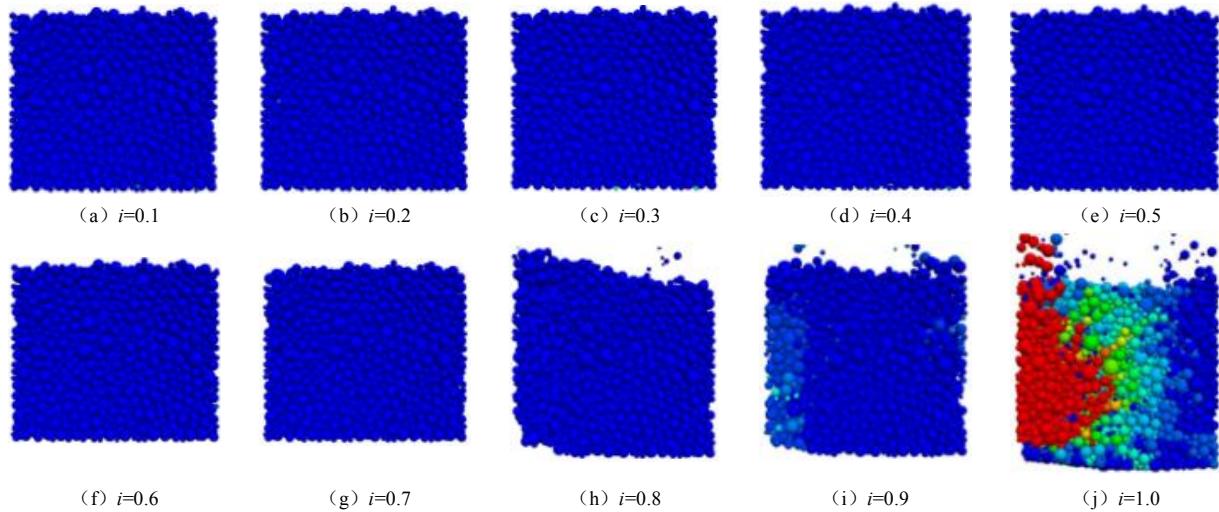


图 8 坚向渗流下粉砂土随水力梯度变化情况

Fig. 8 Variation of silty sand with gradient under vertical seepage

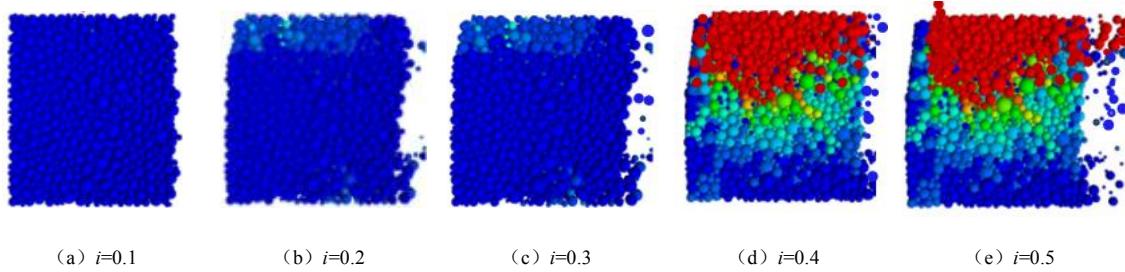


图 9 水平向渗流下粉砂土随水力梯度变化情况

Fig. 9 Variation of silt with gradient under horizontal seepage

水力梯度从 0.1, 0.2, 0.3, …, 逐级增加, 水力梯度施加至 0.7 时, 粉砂几乎无变化; 当水力梯度增至 0.8 时, 土样出现从底部被整体抬升的趋势, 发生少量细小颗粒流失的现象; 水力梯度继续增至 1.0 时, 土体发生了整体的抬升, 土体表面颗粒簇发生整体迁移的现象。模拟结果表明, 试样的临界水力梯度在 0.8 左右。

b) 粉砂水平向渗流下的渗透变形情况

粉砂土的水平向渗流中水力梯度也是由 0.1, 0.2, 0.3 依次逐级抬升, 图 9 给出了粉砂土在水平向渗流下试样随水力梯度变化的情况。

从图 9 中可以看出, 当水力梯度增至 0.3 时, 试样底部细小颗粒也开始发生迁移, 水力梯度继续增大至 0.4, 此时试样发生颗粒成团的流失, 土体发生了渗透变形。水力梯度加载至 0.5 时, 土体颗粒发生了更加显著的整体性渗流破坏。根据模拟结果, 得到粉砂土水平向渗流的临界水力梯度在 0.4 左右。

(2) 粉砂土坚向和水平向渗流下配位数变化情况分析

土体的配位数表示了颗粒间的接触数, 是表达土颗粒间接触情况的参数之一, 总配位数是颗粒与颗粒之间以及颗粒与墙之间的平均接触数, 反映出试样的压密程度; 力学配位数为颗粒与颗粒之间接触数大于 2 时的颗粒接触数, 反映额土骨架的压密程度。图 10, 11 给出了粉砂土在坚向和水平向渗流作用下, 配位数随水力梯度的变化情况。

图 10, 11 可以看出, 当坚向渗流的水力梯度为 0.8, 水平向渗流水力梯度为 0.4 时, 土体的两个配位数都发生迅速的下降, 说明此时的土体状态发生了较大的变化, 即渗透变形发生。图中, 总配位数和力学配位数都在随着水力梯度的增大而不断降低, 总的配位数较力学配位数下降更快速, 幅度也更大。这是由于水力梯度增大, 颗粒发生了移动, 颗粒的接触数减小, 但在水力梯度增加至土体渗透变形前的整个过程中, 总配位数下降幅度明显大于力学配位数, 说明发生移动的多为小颗粒, 小颗粒的迁移使土体中接触数减少, 随之小颗粒填充至骨架颗粒孔隙间, 与大颗粒发生接触, 保持了力学配位数的大小。

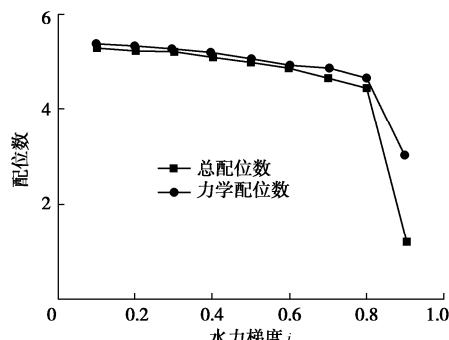


图 10 竖向渗流下粉砂配位数随水力梯度变化

Fig. 10 Variation of coordination number with gradient under vertical seepage

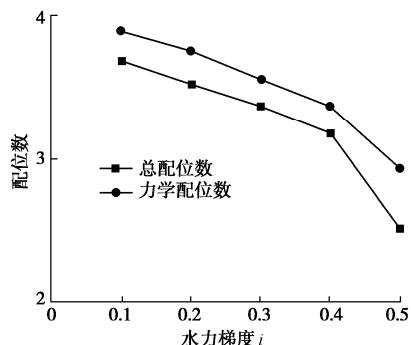


图 11 水平向渗流粉砂配位数随水力梯度变化

Fig. 11 Variation of coordination number with gradient under horizontal seepage

3 结 论

(1) 粉砂在水平向能承受的渗流破坏作用一般低于竖向渗流。

(2) 数值模拟结果与模拟试验过程中粉砂的渗流变化过程相符, 数值方法所测得的临界水力梯度与试验测得的结果亦较为吻合。

(3) 竖向和水平向渗流下, 粉砂的总配位数和力学配位数均随着水力梯度的抬升而衰减, 当土体发生渗透破坏, 土体配位数出现迅速降低。

参考文献:

[1] 王新志, 王 星, 胡明鉴, 等. 吹填人工岛地基钙质粉土夹

层的渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3127 – 3135. (WANG Xin-zhi, WANG Xing, HU Ming-jian, et al. Study of permeability of calcareous silty layer of foundation at an artificial reclamation island[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3127 – 3135. (in Chinese))

- [2] 陈 群, 谷宏海, 邹玉华, 等. 水平和竖向渗流情况下砾石土渗透性的对比分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 1 – 5. (CHEN Qun, GU Hong-hai, ZOU Yu-hua, et al. Comparative analysis of horizontal and vertical permeability of clayey gravelly soil[J]. Journal of China Three Gorges University, 2014, 36(5): 1 – 5. (in Chinese))
- [3] RICHARDS K S, REDDY K R. Experimental Investigation of Initiation of Backward Erosion Piping in Soils [J]. Geotechnique, 2012, 62(10): 933 – 942.
- [4] 亓立成, 陈 群, 朱亚军. 不同竖向应力和剪切位移下砂砾石与砂双层土渗透试验[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 63 – 67. (QI Li-cheng, CHEN Qun, ZHU Ya-jun. Seepage tests on double-layer soils composed of sandy gravel and sand under different stresses and shear displacements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 63 – 67. (in Chinese))
- [5] NI Xiao-dong, WANG Yuan, CHEN Ke, et al. Improved similarity criterion for seepage erosion using mesoscopic coupled PFC-CFD model[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(8): 3069 – 3078.
- [6] JIANG Ming-jing, SHEN Zhi-fu, WANG Jian-feng. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 147 – 163.
- [7] 蒋中明, 袁 涛, 刘德谦, 等. 粗粒土渗透变形特性的细观数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 752 – 758. (JIANG Zhong-ming, YUAN Tao, LIU Xiao-fan, et al. Mesoscopic numerical tests on seepage failure characteristics of coarse grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 752 – 758. (in Chinese))

(编校: 孙振远)