

干密度对低水力梯度下花岗岩崩积土 饱和渗流特征的影响

罗桂鹏^{1,2}, 蒋秀姿^{1,2}, 杨贵清^{1,2}, 董辉^{1,2}

(1.湘潭大学 土木工程学院湖南 湘潭 411105; 2.岩土力学与工程安全湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘要: [目的] 探究花岗岩崩积土低水力梯度下的渗流规律,为区域的工程建设和地质灾害防治提供科学依据。[方法] 通过开展不同干密度条件下花岗岩崩积土的常水头渗透试验,研究了花岗岩崩积土在低水力梯度下的渗流特征。[结果] 不同初始干密度条件下花岗岩崩积土渗流速度(v)与水力梯度(i)的关系曲线($v-i$)在低水力梯度下均表现出不同程度的波动性,且渗透系数均随水力梯度增加而增大,当水力梯度增大到临界水力梯度 i_{cr} 时,渗透系数基本保持不变,近似线性渗流,此时的渗透系数随干密度增加呈对数下降。同时,当土体干密度小于 1.5 g/cm^3 时临界水力梯度 i_{cr} 波动较大,当干密度大于 1.5 g/cm^3 时临界水力梯度 i_{cr} 随干密度呈线性增长。[结论] 不同干密度条件下花岗岩崩积土的饱和渗流在低水力梯度下均具有波动特征,且渗流波动性的内在原因与孔隙特征的变化有关。研究成果为花岗岩崩积土的渗流过程研究提供了新的视角,为花岗岩崩积土的固结分析和渗透稳定性计算提供了参考。

关键词: 干密度; 花岗岩崩积土; 低水力梯度; 波动性; 临界水力梯度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0022-08

中图分类号: TU411.4

文献参数: 罗桂鹏, 蒋秀姿, 杨贵清, 等.干密度对低水力梯度下花岗岩崩积土饱和渗流特征的影响[J].水土保持通报, 2025, 45(2): 22-29. Luo Guipeng, Jiang Xiuzi, Yang Guiqing, et al. Effect of dry density on saturated seepage characteristics of granite colluvial soil under low hydraulic gradient [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 22-29. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.003; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.003.

Effect of dry density on saturated seepage characteristics of granite colluvial soil under low hydraulic gradient

Luo Guipeng^{1,2}, Jiang Xiuzi^{1,2}, Yang Guiqing^{1,2}, Dong Hui^{1,2}

(1.College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China;

2.Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering Safety of Hunan Province, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: [Objective] The seepage behavior of granite colluvial soil under a low hydraulic gradient was explored, in order to provide a scientific basis for regional engineering construction and geological disaster prevention and mitigation. [Methods] Constant head permeability tests were conducted on granite colluvial soil with varying initial dry densities to analyze its seepage characteristics under low hydraulic gradient. [Results] The relation curves between seepage velocity (v) and hydraulic gradient (i) ($v-i$) of granite colluvial soil exhibits varying degrees of seepage fluctuation under low hydraulic gradients. The permeability coefficient increases with the hydraulic gradient across all dry density conditions. When the hydraulic gradient reached the critical hydraulic gradient (i_{cr}), the permeability coefficient remained stable and undergoes approximately linear seepage. At this time, the permeability coefficient decreases logarithmically with the increase of dry density. Additionally, under low dry density conditions, the transition in the critical hydraulic gradient fluctuates significantly. However, when the dry density exceeds 1.5 g/cm^3 , the critical hydraulic gradient (i_{cr}) increases linearly with dry density. [Conclusion] The saturated seepage behavior of granite colluvial soil under different dry density conditions exhibits fluctuation characteristics under a low hydraulic

收稿日期: 2024-09-27

修回日期: 2024-12-30

采用日期: 2024-12-30

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“坡积相裂隙性多孔介质逾渗相变的渗流稳定差异研究”(42272304); 湖南省教育厅优秀青年项目“盐环境下花岗岩残积土结构—渗流响应双尺度机制研究”(24B0125)

第一作者: 罗桂鹏(1998—), 男(汉族), 湖南省湘乡市人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程防灾减灾。Email: 1965389509@qq.com。

通信作者: 蒋秀姿(1990—), 女(汉族), 湖南省永州市人, 博士, 讲师, 主要从事环境地质与地质灾害形成机理的研究。Email: jiangxiuzi@xtu.edu.cn。

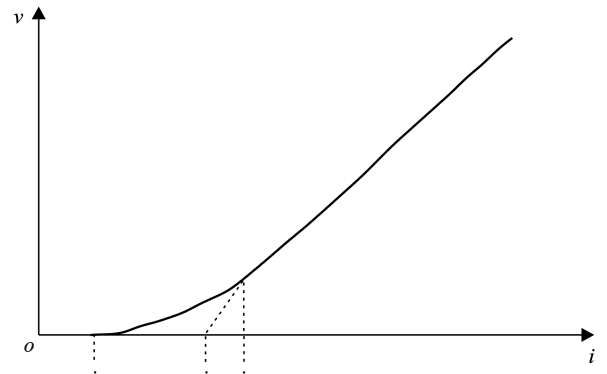
gradient. The internal mechanism driving these fluctuations is closely related to variations in pore structure. These findings offer a novel perspective on the seepage process of granite colluvial soil and provide a reference for consolidation analysis and seepage stability calculation in engineering applications.

Keywords: dry density; granite colluvial soil; low hydraulic gradient; fluctuation; critical hydraulic gradient

在多孔介质的渗流研究中,达西渗流规律已得到了众多工程验证和广泛应用^[1-2]。然而,越来越多的资料证实,在低水力梯度下土体存在很多偏离达西渗流规律的现象,尤其是富含黏土矿物的低渗透性岩土^[3-4]。1960年 P. Bakes^[5]首次在文献中报道黏土具有初始水力梯度。随后, R. J. Miller^[6]在研究水在黏土中的运动时发现存在一个初始水力梯度,低于这个水力梯度,水基本上是不可移动的。低水力梯度下的非线性渗流渗流速度(v)与水力梯度(i)的关系曲线($v-i$)如图 1 所示。具有两个特征水力梯度:初始水力梯度(i_0)和临界水力梯度(i_{cr})。当水力梯度 i 小于 i_0 时,孔隙中的水不发生流动,当 $i_0 < i < i_{cr}$ 时,孔隙中为非线性渗流;当 $i > i_{cr}$ 时,渗流为符合达西定律的线性渗流,不同的岩土体表现出来的非直线段存在差异。而 S. Hansbo^[7-8]在研究黏土的固结特性时并未发现前人所说的起始水力梯度,但存在临界水力梯度,当水力梯度小于临界水力梯度时,低渗透黏土中的水流量与水力梯度的幂函数成正比。此后,国内学者也陆续在含黏土的土体中发现了非达西渗流行为^[3,4,9-11]。1922年, E. C. Bingham^[12]最先结合 Maxwell 的观点认为在极小的剪应力下物质的变形特性可分为固体和流体,流体在极小剪应力下会产生持续变形,而固体的变形则不会持续,在理论上为土体渗流的初始水力梯度的存在奠定了基础。为探究低水力梯度下岩土体非线性渗流的内在原因,部分学者从流体性质、物质组成和孔隙结构等方面进行了相关研究^[3,4,10-11],考虑到干密度是影响土体孔隙结构的重要因素,且与岩土体力学、渗流性质密切相关^[13-14]。赵蔚^[15]通过水-土特征曲线预测了不同干密度条件下湖南黏土非线性渗流的起始水力梯度。Wang Haike 等^[10]研究了不同干密度条件下黄土的低速非线性渗流,发现黄土的起始水力梯度与干密度的关系符合幂函数,而临界水力梯度随干密度先减小后增大。

花岗岩崩积土广泛分布于中国南方地区,在水的入渗作用下极易出现渗流破坏,时常导致边坡失稳、水土流失和地基塌陷等工程问题。目前,国内已有大量学者通过试验和数值方法研究了花岗岩崩积土的渗流规律^[16-19]。如胡其志等^[16]研究了不同黏粒含量对花岗岩崩积土渗透系数的影响。Wen Tiande 等^[17]发现花岗岩崩积土的饱和渗透系数与土体的孔隙特征密切相关。王志兵等^[19]研究了压实度对花岗

岩崩积土渗流的影响。周宇^[20]发现花岗岩崩积土的渗透系数随着干密度的增大而减小,而且渗透系数与干密度之间符合指数函数的关系。此外,已有学者关注到花岗岩崩积土在高水力梯度下发生渗蚀破坏时的高速非线性渗流^[18,21]。然而, Wang Shengwei 等^[3]研究认为砂粒含量少于 50% 的黏-砂混合土即会产生低速非线性渗流,且少量的黏土矿物就能导致结合水量急剧增加^[22],从而改变土体孔隙中的渗流。因此若对花岗岩崩积土的饱和渗流认识不全面,可能会导致花岗岩崩积土低水力梯度下的固结渗流计算和渗流稳定性分析出现偏差。



注: i_0 为初始水力梯度; i_b 为启动水力梯度; i_{cr} 为临界水力梯度; i 为水力梯度; v 为渗流速度。下同。

图 1 低速非达西渗流特征曲线

Fig.1 Low-velocity non-Darcy seepage characteristic curve

因此,本文以湖南湘乡某边坡浅层花岗岩崩积土为研究对象,通过开展低水力梯度下花岗岩崩积土的饱和渗透试验,研究不同干密度条件下花岗岩崩积土的渗流规律,明确花岗岩崩积土进入达西线性渗流的临界条件,厘清花岗岩崩积土饱和渗流产生波动性的内在原因,为提高浅层花岗岩崩积土中水的运动规律和渗流分析的准确性提供理论依据。

1 材料和试验方法

本文所选取的花岗岩崩积土取自于湖南省湘乡市虞塘镇附近某边坡场地,取样深度约为 0.5 m,取样时间为 2023 年 8 月夏季,试验时间为 8 月到 9 月。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对花岗岩崩积土进行了基本物理性质测试(表 1)。结果表明,花岗岩崩积土试样中主要以砂粒为主,其含量

高达 46.6%，黏粒含量为 11.1%，砾粒含量为 7.2%。试样的最大干密度为 1.875 g/cm³。采用日本理学公司的 X 射线多晶粉末衍射仪 D/max-2 500/PC 进行 X 射线衍射分析，试验条件为电压为 40 kV，电流为 250 mA，功率 10 kW，扫描角度 2θ 为 5°~80°，扫描速

度为 5°/min，得到衍射图谱。采用 K 值法对衍射图谱进行定量分析方法，确定土中的矿物组分及含量，结果如表 2 所示。可以看出试验所用花岗岩崩积土主要由石英、长石和黏土矿物组成，黏土矿物含量近 50%，其中黏土矿物主要有高岭石、伊利石和蒙脱石。

表 1 花岗岩崩积土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of granite colluvial soil

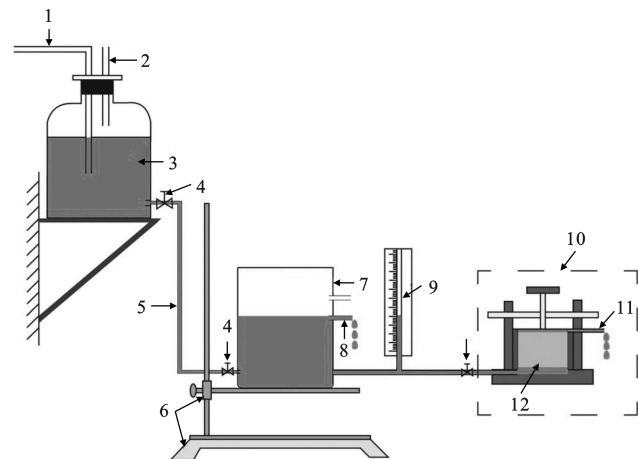
液限/ %	塑限/ %	最优含 水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	含量/%					
				砾石 (>2 mm)	粗砂 (2~0.5 mm)	中砂 (0.5~0.25 mm)	细砂 (0.25~0.075 mm)	粉粒 (0.075~0.0005 mm)	黏粒 (0.0005>mm)
44.66	30.76	25.79	1.875	7.2	12.5	11.5%	22.6	35.1	11.1

表 2 花岗岩崩积土的矿物成分

Table 2 Mineral composition of granite colluvial soil

矿物种类	长石	高岭石	伊利石	蒙脱石	石英
含量/%	37	7	14	9	13

考虑到坡前堆积的松散花岗岩崩积土原生结构已破坏，故本文将采用重塑样进行渗流试验。首先，将花岗岩崩积土试样烘干后，考虑到试样中大于 2 mm 颗粒含量少，剔除砾粒组。根据试样尺寸（直径为 61.8 mm，高为 40 mm）分别按干密度 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60, 1.70, 1.80 g/cm³ 计算重量称取土样，随后喷洒适量去离子水以达到最优含水率 25.79%，充分搅拌均匀土样含水均匀，密封 24 h 后将试样装入环刀，制备各干密度条件下的重塑土样，抽真空饱和 24 h。为排除制样和试验操作过程带来的误差，每种干密度分别制作 4 个试样进行平行试验，误差范围控制在 5% 以内。试验设置如图 2 所示。



注: 1 水源; 2 排气口; 3 供水瓶; 4 止水夹; 5 硅胶管; 6 升降台; 7 水箱; 8 排水口; 9 测压管; 10 渗透仪; 11 出水口; 12 土样。

图 2 试验装置图(修改自 Wang Haiké^[10])

Fig.2 Schematic of experimental apparatus (modified after Wang Haiké^[10])

试验采用改进的 TST-55 渗透仪进行常水头渗透试验。试验过程中通过供水瓶向水箱连续供水进

行试验，水箱内设排水管道，以保持水头高度一致。水箱放置在升降台上，调节其高度以达到试验所需的水力梯度。试验所选水力梯度从 2.25 以 2 为增量递增到 24.25，每个水力梯度渗透半个小时待渗流稳定后测定其数据，连续读取 3 次数据后取平均值，随后增加至下一水力梯度。

2 试验结果

2.1 渗透速度变化规律

不同干密度条件下花岗岩崩积土的 $v-i$ 关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出，花岗岩崩积土试样不存在明显的起始水力梯度 i_0 ，但大多数试样的 $v-i$ 曲线在低水力梯度下局部表现出波动性，如 $\rho_d = 1.3, 1.4, 1.6, 1.7, 1.8$ g/cm³，随着水力梯度的继续增加， $v-i$ 曲线近似直线，说明试样符合达西定律进入线性渗流阶段。当 $\rho_d = 1.5$ g/cm³ 时， $v-i$ 曲线一直近似线性关系。

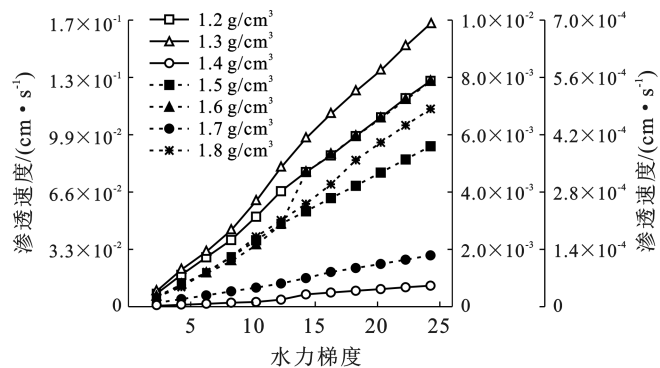


图 3 渗透速度均值随水力梯度的变化

Fig.3 Variation of seepage velocity with hydraulic gradient

2.2 渗透系数变化规律

根据 $v=ki$ 公式计算花岗岩崩积土的渗透系数，式中 v 为渗流速度， k 为渗透系数， i 为水力梯度。通过计算得到各干密度条件下水力梯度 i 与渗透系数 k 的关系(如图 4 所示)，当水力梯度较小时，渗透系数

随水力梯度增加呈非线性增加,当水力梯度增大到一定程度,即临界水力梯度 i_{cr} 时,随着水力梯度的继续增大,渗透系数几乎保持稳定,表现出与水力梯度无关的特点,说明此时花岗岩崩积土中的渗流符合达西定律。图 4 中所示有些曲线在进入达西渗流阶段后

渗透系数的轻微降低可能与渗流过程中花岗岩崩积土的结构遭到轻微破坏有关。当水力梯度 i 大于 18.25 时,所有干密度条件下的花岗岩崩积土均进入线性的达西渗流阶段,且此时渗透系数随着干密度的增加呈对数线性下降(图 5)。

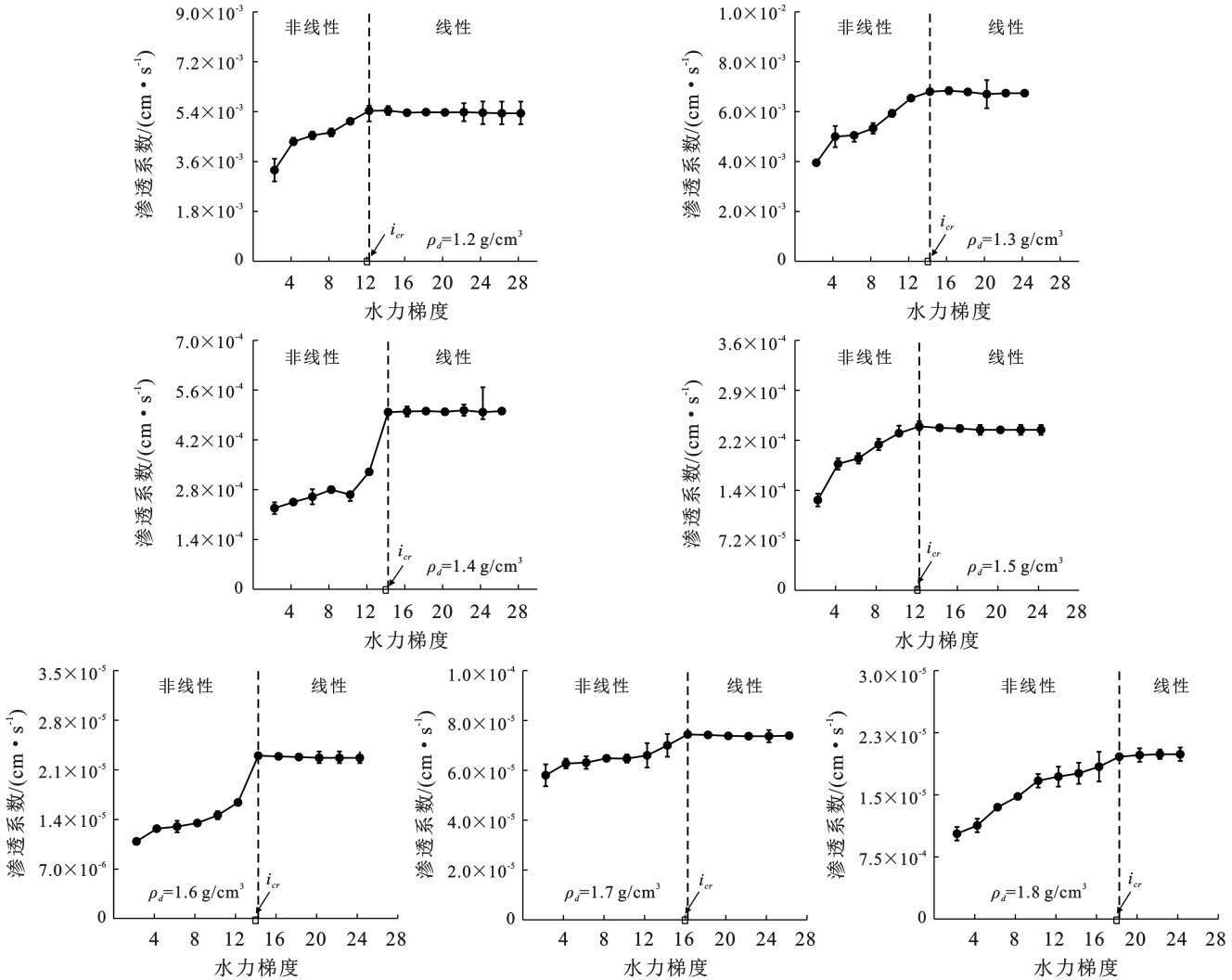


图 4 不同干密度花岗岩崩积土的水力梯度与渗透系数的变化规律

Fig.4 Variation law of hydraulic gradient and permeability coefficient of granite colluvial soil with different dry density

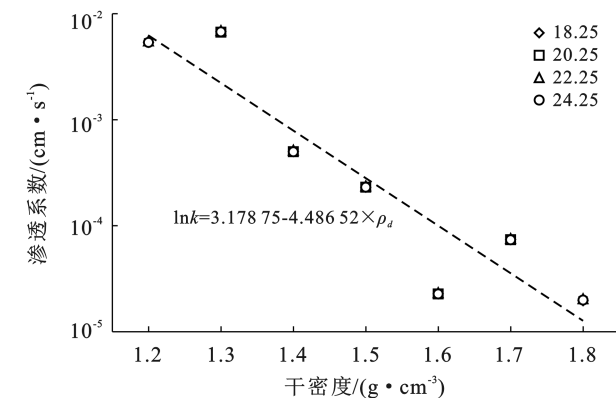


图 5 干密度与线性渗流阶段渗透系数的关系

Fig.5 Relationship between initial dry density and permeability coefficient in linear seepage stage

2.3 临界水力梯度

根据花岗岩崩积土具有波动性的渗流转变为稳定的达西渗流的临界水力梯度(图 6)发现,当 $\rho_d < 1.5 \text{ g/cm}^3$ 时,土体的压实度小,在渗流过程中内部结构不稳定, i_{cr} 表现出随干密度的增大具有一定波动性。当 $\rho_d > 1.5 \text{ g/cm}^3$ 后,土样的压实度越来越大,临界水力梯度随干密度呈线性增加,并符合式 1(图 6)。

$$i_{cr} = -17.75 + 20\rho_d \quad (\rho_d > 1.5) \quad (1)$$

式中: i_{cr} 为临界水力梯度; ρ_d 为干密度。

通过式(1)可以初步估算坡前松散堆积的花岗岩崩积土的进入线性渗流的临界水力梯度,为坡前松散堆积花岗岩崩积土的渗流分析提供计算依据。

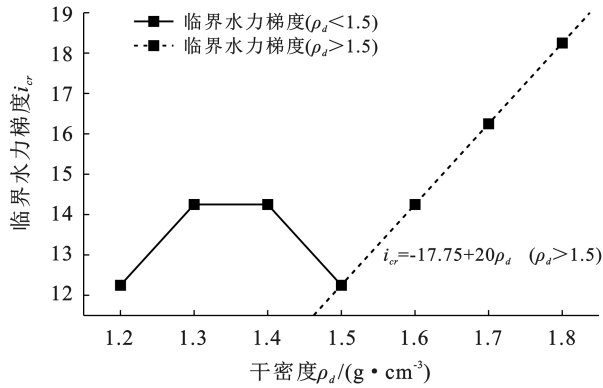


图 6 临界水力梯度与花岗岩崩积土干密度的关系

Fig.6 Variation of critical hydraulic gradient in relation to dry density of granite colluvial soil

3 讨论

3.1 线性渗流阶段的渗透系数预测

根据经典渗流理论,渗透率 K 与渗透系数 k 满足以下公式:

$$k = K \times \rho_w \times g / \mu \quad (2)$$

式中: ρ_w 为流体密度(g/cm^3); g 为重力加速度(m/s^2); K 为渗透率(cm^2); μ 为动态黏滞系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。其中 K 可表示为: $K = k\mu / \rho_w g$ 。

渗透率 K 是描述岩土体渗透性的内在属性,表征一定的水力梯度下,试样允许流体通过的能力,通常与土颗粒或孔隙的形状或排列方式有关。花岗岩崩积土中含有大量的粉粒和黏粒组成的微小颗粒,微小颗粒周围含有一定量不易流动的结合水。随着干密度的增加,孔隙结构进一步压实,孔隙尺寸减小,导致颗粒周围的结合水更加难以流动,从而影响花岗岩崩积土中孔隙的渗透性,进而影响花岗岩崩积土的渗透率。选择临界水力梯度下的渗透系数计算各干密度条件下花岗岩崩积土的渗透率,由于试验在温度 25° 条件下进行,因此 $\rho_w = 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$, $g = 9.98 \text{ m}/\text{s}^2$ 和 $\mu = 0.897 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 计算渗透率 K (如图 7 所示)。此时,花岗岩崩积土的渗透率与干密度符合以下关系:

$$\lg K_g = -8.86214 - 4.486\rho_d \quad (3)$$

式中: K_g 为渗透率; ρ_d 为干密度。

不难看出,式(3)与线性渗流阶段的渗透系数具有相近的斜率(图 5)。因此,可以通过式 $k_g = K_g \times \rho_w \times g / \mu$ 预测不同干密度下花岗岩崩积土线性渗流阶段的渗透系数。

对于黏性土来说,临界水力梯度主要取决于黏土矿物间水分子的形态。通过总结前人报道^[3,6,23-24]中的渗透率与临界水力梯度的关系,可以发现两者之间

呈指数关系: $i_0 = A \times K^B$, 其中, $A = 4.0 \times 10^{-12}$, $B = -0.78$ 。因此可以看出不仅是黏土,含黏土一砂混合物^[3]、花岗岩崩积土的临界水力梯度也符合上述规律(图 8)。

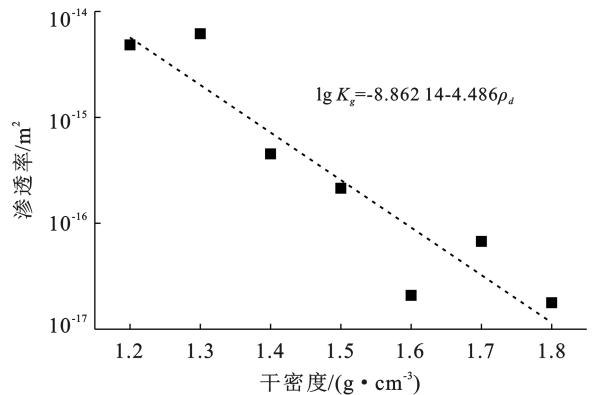


图 7 渗透率与干密度的关系

Fig.7 Relationship of intrinsic permeability and initial dry density

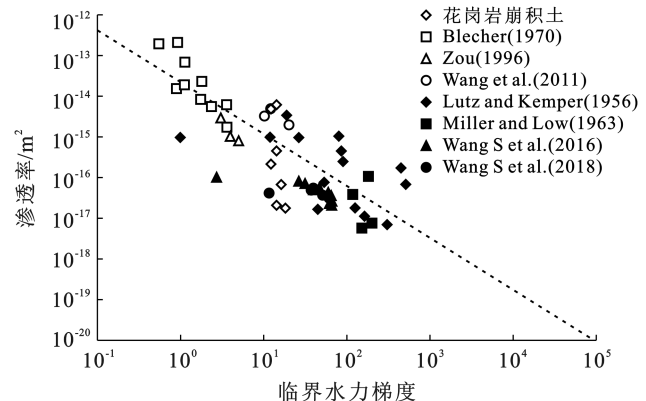


图 8 花岗岩崩积土渗透率与临界水力梯度的关系

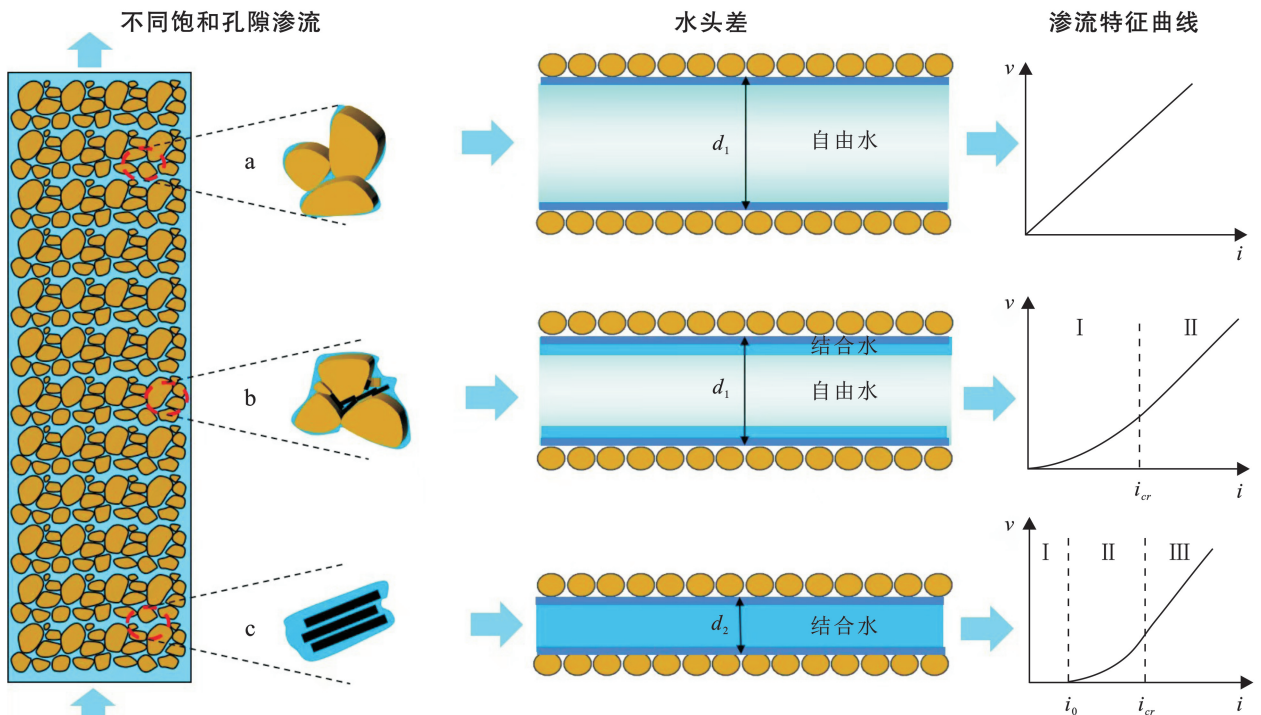
Fig.8 Relationship of intrinsic permeability and critical hydraulic gradient of granite colluvial soil

3.2 干密度对渗流波动特征的影响

从组成花岗岩崩积土的矿物成分可以发现其中含有一定量的黏土矿物,黏土矿物由于其特殊的表面性质通常会表现出非线性渗流的特点。D. Swartzen-druber^[25]认为非线性渗流主要是水—黏土矿物相互作用产生非牛顿流体的黏滞性导致。一些学者认为黏土中的非线性渗流主要取决于黏土矿物间的大孔隙和微小孔隙中的自由水和结合水之间的转换^[26-27]。有的学者则认为是孔隙变化、黏土表面性质、渗透压力使黏土颗粒重新定向排列等作用的相互耦合作用引起的黏土介质的非线性渗流^[28]。总的来说,由于固—液界面效应,土颗粒与水之间始终存在吸附层,且与颗粒大小无关,在土体孔隙中结合水最接近土颗粒表面,自由水次之。饱和土体中均含有自由水,只要存在水头差,就自然而然地参与到渗流运动中。同

时,对于含黏土矿物的土体来说,受双电层的微电场力作用,黏土颗粒表面的结合水具有一定的黏滞性和抗剪性,也会导致结合水和自由水具有完全不同的渗流特性。可见,水在土体孔隙中的存在形式决定了土体的渗流规律。在大多数情况下,孔隙中水的形态主要取决于孔隙的大小^[15]。花岗岩崩积土中含大量微小粒组(粉粒和黏粒),微小颗粒的存在会一定程度减小孔隙尺寸,从而显著增加土体中的结合水含量^[19]。因此,花岗岩崩积土孔隙中可能同时存在如图 9a—9c 所示的 3 种饱和孔隙渗流。考虑到花岗岩崩积土中砂粒含量多,近 50%,绝大多数情况下只要存在水头差,土中大孔隙里的自由水,就直接参与到渗流中(图

9a)。然而,花岗岩崩积土中含有黏粒、粉粒等细小颗粒,颗粒周围吸附着致密的结合水膜(图 9b—9c),尤其是比表面积大的黏土矿物,当水力梯度较低时,颗粒周围的结合水难以发生流动,随着水力梯度的增大,颗粒周围的弱结合水开始流动,受参与渗流的结合水影响,低水力梯度下的渗流曲线偏离线性,产生波动。当水力梯度的持续增大到一定程度(i_{cr})时,弱结合水全部参与到孔隙渗流中,此时孔隙的有效渗流孔径达到强结合水边缘,土体孔隙中所有能够流动的结合水和自由水同时运动,渗透系数达到理论最大值且不再随着水力梯度的增加而发生改变,符合线性渗流规律。



注: $d_1 >$ 结合水膜厚度, $d_2 <$ 结合水膜厚度。

图 9 花岗岩崩积土孔隙中的饱和渗流模型

Fig.9 Saturated seepage patterns in pore space of granitic colluvial soils

随着干密度增加,土体的孔隙体积逐渐减小,大孔隙体积也在减小,同时出现了大量的小孔隙^[29]。因此,可以推断本文试验中的花岗岩崩积土在干密度较小时($< 1.5 \text{ g/cm}^3$),花岗岩崩积土中总孔隙体积大,且大、中孔隙所占比例大,土体中大孔隙中的自由水参与渗流,临界水力梯度相对较小,且在渗流过程中由于微小孔隙所占比例小,黏土矿物遇水易分散,影响土体孔隙结构稳定性,故而在干密度小于 1.5 g/cm^3 时,临界水力梯度 i_{cr} 容易出现波动。随着干密度的增加($> 1.5 \text{ g/cm}^3$),大孔隙占比减小,微小孔隙占比增大,因此,在渗流过程中有更多的中、小孔隙

(图 9b—c)参与,靠近颗粒表面的结合水膜所占据的孔隙体积增大,从而需要更高的水力梯度驱动,导致临界水力梯度 i_{cr} 增长。同时,干密度增大孔隙间的连通性减弱,土中孔隙复杂程度增大,土体中孔隙的方向更趋于水平方向^[29],因此,试样进入线性渗流阶段的稳定渗透系数也随着干密度增大而降低。

4 结论

本文通过常水头渗透试验研究了不同干密度花岗岩崩积土的低水力梯度下的渗流特征,得到以下结论。

(1) 不同干密度条件下,花岗岩崩积土的渗透系数均随着水力梯度的增加先增大,当水力梯度增大到临界水力梯度 i_{cr} 时,渗透系数基本保持不变,花岗岩崩积土进入线性渗流阶段,存在明显的线性渗流转变。当水力梯度超过 i_{cr} 时,渗透系数随干密度呈对数降低。

(2) 当干密度小于 1.5 g/cm^3 时,受结构稳定性影响界水力梯度 i_{cr} 出现小范围波动,随着干密度增大,临界水力梯度 i_{cr} 随干密度的变化符合线性公式,可应用于估算花岗岩崩积土的产生线性渗流的临界水力梯度。

(3) 花岗岩崩积土的渗透率随干密度增大呈对数降低,基于此确定了线性渗流阶段花岗岩崩积土渗透系数的预测方程。结合不同干密度下的孔隙特征,初步探讨了干密度对花岗岩崩积土孔隙中结合水和自由水在渗流过程中的参与程度及其对渗流特征的影响。

本文的研究结论为花岗岩崩积土低速渗流行为提供了新的见解,进一步完善了花岗岩崩积土的渗流过程研究,可为花岗岩崩积土相关渗流计算提供一定的理论指导。然而,南方各区域花岗岩崩积土受母岩和风化程度影响物质组成存在显著差异,因此论文中的临界水力梯度与干密度的线性关系在应用时还需根据试验数据进行拟合。同时,课题组后续也将开展微观孔隙结构渗流的分子模拟,进一步从微观上揭示花岗岩崩积土低速渗流波动性特征的内在机理。

参考文献 (References)

- [1] Cedergren H R. Seepage, drainage, and flow nets [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [2] Kutitiek M. Non-darcian flow of water in soils: Laminar region A review [J]. *Developments in Soil Science*, 1972, 2: 327-340.
- [3] Wang Shengwei, Zhu Wei, Fei Kang, et al. Study on non-darcian flow sand-clay mixtures [J]. *Applied Clay Science*, 2018, 151: 102-108.
- [4] Al-Taie L, Pusch R, Knutsson S. Hydraulic properties of smectite rich clay controlled by hydraulic gradients and filter types [J]. *Applied Clay Science*, 2014, 87: 73-80.
- [5] Basak P. Non-darcy flow and its implications to seepage problems [J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1977, 103(4): 459-473.
- [6] Miller R J, Low P F. Threshold gradient for water flow in clay Systems1 [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1963, 27(6): 605.
- [7] Hansbo S. Consolidation of Clay, with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains: A Study Made in Connection with Full-scale Investigations at Skå-Edeby [M]. Sweden: Chalmers Tekniska Hogskola, 1960.
- [8] Hansbo S. Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow [J]. *Géotechnique*, 2001, 51(1): 51-54.
- [9] 齐添, 谢康和, 胡安峰, 等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2007, 41(6): 1023-1028.
Qi Tian, Xie Kanghe, Hu Anfeng, et al. Laboratorial study on non-Darcy seepage in Xiaoshan clay [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, 41(6): 1023-1028.
- [10] Wang Haikē, Qian Hui, Gao Yanyan. Non-darcian flow in loess at low hydraulic gradient [J]. *Engineering Geology*, 2020, 267: 105483.
- [11] 许增光, 冯上鑫, 柴军瑞, 等. 黏土结合水起始剪切力对非达西渗流的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6): 200-203.
Xu Zengguang, Feng Shangxin, Chai Junrui, et al. The effect of initial shear stress of clay bound water on non-Darcy flow [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(6): 200-203.
- [12] Bingham E C. Fluidity and plasticity [M]. New York: Mcgraw-Hill, 1922.
- [13] 梁越, 龚胜勇, 杨咏梅, 等. 间断级配散粒土侵蚀过程及强度演变机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(3): 632-639.
Liang Yue, Gong Shengyong, Yang Yongmei, et al. Erosion process and strength evolution mechanism of gap-graded cohesionless soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(3): 632-639.
- [14] 杨德欢, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 细粒迁移及组构变化对黏土渗透性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(11): 2009-2017.
Yang Dehuan, Wei Changfu, Yan Rongtao, et al. Experimental study on effects of fine particle migration and fabric change on permeability of clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(11): 2009-2017.
- [15] 赵蔚. 考虑微观孔隙特征的饱和黏土非线性渗透特性研究[D]. 湖北 武汉: 湖北工业大学, 2021.
Zhao Wei. Research on nonlinear permeability characteristics of saturated clay considering microscopic pore [D]. Wuhan, Hubei: Hubei University of Technology, 2021.
- [16] 胡其志, 洪昌伟, 李鸣. 不同黏粒含量对花岗岩残积土渗透性影响[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(32): 267-271.
Hu Qizhi, Hong Changwei, Li Ming. Effect of different clay content on the permeability of granite residual soil

- [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(32):267-271.
- [17] Wen Tiande, Chen Xiangsheng, Shao Longtan. Effect of multiple wetting and drying cycles on the macropore structure of granite residual soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 614:128583.
- [18] 蔡沛辰, 阙云, 李显. 非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 54-63.
Cai Peichen, Que Yun, Li Xian. Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6):54-63.
- [19] 王志兵, 谈勋勋, 王远, 等. 不同压实度花岗岩残积土的渗流模拟[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(14): 5913-5921.
Wang Zhibing, Tan Xunxun, Wang Yuan, et al. Seepage simulation of granite residual soil with different compaction degrees [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(14):5913-5921.
- [20] 周宇. 干湿循环下花岗岩残积土的渗透性及微观结构特征研究[D]. 福建 厦门: 厦门大学, 2022.
Zhou Yu. Study on permeability and microstructure characteristics of granite residual soil under drying-wetting cycles [D]. Xiamen, Fujian: Xiamen University, 2022.
- [21] 韩杰欣, 邓芷慧, 王旌靡, 等. 干湿交替条件下花岗岩崩岗区土壤裂隙发育规律[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5):262-271.
Han Jiexin, Deng Zhihui, Wang Jingmi, et al. Development of soil cracks in granite Benggang area under wetting-drying cycles [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5):262-271.
- [22] 黄远浩, 张志超, 肖杨, 等. 砂-黏土中结合水含量及渗透性的非等温耦合效应[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(2):375-384.
Huang Yuanhao, Zhang Zhichao, Xiao Yang, et al. Non-isothermal coupled effects of bound water content and permeability in sand and clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(2):375-384.
- [23] Lutz J F, Kemper W D. Intrinsic permeability of clay as affected by clay-water interaction [J]. *Soil Science*, 1959, 88(2):83-90.
- [24] Wang Xuewu, Yang Zhengming, Sun Yuping, et al. Experimental and theoretical investigation of nonlinear flow in low permeability reservoir [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11:1392-1399.
- [25] Swartzendruber D. Modification of darcy's law for the flow of water in soils [J]. *Soil Science*, 93(1):22-29.
- [26] 宿青山, 侯杰, 段淑娟. 对饱和黏性土渗透规律的新认识及其应用[J]. *长春地质学院学报*, 1994, 24(1):50-56.
Su Qingshan, Hou Jie, Duan Shujuan. A new recognition on the law of water seepage in saturated cohesive soil and its application [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1994, 24(1):50-56.
- [27] 许传福. 弱透水层饱和黏性土中水分渗透规律研究[J]. *吉林地质*, 2008, 27(1):30-32.
Xu Chuanfu. Studying the permeable regularities of water in less permeable and saturated clay [J]. *Jilin Geology*, 2008, 27(1):30-32.
- [28] 欧光照, 吴益平, 王增帅, 等. 黏土介质地下水非达西渗流的研究进展[J]. *安全与环境工程*, 2013, 20(5):140-143.
Ou Guangzhao, Wu Yiping, Wang Zengshuai, et al. Research advance on non-darcy seepage of groundwater in clay media [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 20(5):140-143.
- [29] 孙广, 谈勋勋, 刘金明, 等. 不同干密度花岗岩残积土的三维孔隙结构特征[J]. *河南城建学院学报*, 2022, 31(1):18-23.
Sun Guang, Tan Xunxun, Liu Jinming, et al. Three-dimensional pore structure characteristics of granite residual soil with different dry density [J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2022, 31(1): 18-23.