

文章编号: 1005-0523(2025)01-0008-08



地下水渗流作用下泥质粉砂岩颗粒迁移 质量流失的试验研究

吴浪¹, 石钰锋^{1,2}, 王超¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西建筑设计院有限公司, 江西 南昌 330013)

摘要: 南昌地铁隧道下伏风化泥质粉砂岩长期受地下水渗流侵蚀, 导致细小颗粒迁移流失, 破坏岩体结构, 影响隧道安全运营。为研究地下水渗流对颗粒迁移的影响机制, 开展地下水渗流作用下风化泥质粉砂岩颗粒迁移质量流失试验, 并探究试样质量流失率、孔隙度、压实厚度与Talbol幂指数 n 的相互关系。研究表明: 试样质量流失率随时间呈先增大后减小的变化趋势; 试样中细颗粒比例上升, 孔隙度变化幅度增大, 各组试样孔隙度在前10~20 min变化较快, 质量流失较多; 试样渗透率受孔隙度和级配的共同影响, 渗透率与孔隙度呈幂指数函数关系, 系数 k_1 随 n 的升高呈良好的对数型函数趋势增大, 而系数 k_2 则随 n 呈线性增大, 相关系数均大于0.99。

关键词: 风化泥质粉砂岩; 地下水渗流; 颗粒迁移; 质量流失

中图分类号: TU411; [U24]

文献标志码: A

本文引用格式: 吴浪, 石钰锋, 王超. 地下水渗流作用下泥质粉砂岩颗粒迁移质量流失的试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 8-15.

Experimental Study of Particle Migration Mass Loss in Muddy Siltstone Under Groundwater Seepage Effects

Wu Lang¹, Shi Yufeng^{1,2}, Wang Chao¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013 China;

2. East China Jiaotong University Jiangxi Architectural Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330013, China)

Abstract: The underlying weathered argillaceous siltstone of Nanchang Metro tunnel is eroded by groundwater seepage for a long time, which leads to the migration and loss of fine particles, destroys the rock mass structure and affects the safe operation of the tunnel. In order to study the influence mechanism of groundwater seepage on particle migration, the mass loss test of weathered argillaceous siltstone particle migration under groundwater seepage was carried out, the relationship between the Talbol power exponent n and the mass loss rate, porosity and compaction thickness of the sample was investigated. The results show that the mass loss rate of the samples under different compaction thickness increases first and then decreases with time. The proportion of fine particles in the sample increases, and the variation range of porosity increases, the porosity of each group of samples changes rapidly in the first 10~20 min, and the mass loss is more obvious. The permeability of the sample is affected by both porosity and gradation. The relationship between permeability and porosity is a power exponential

收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177162, 52368053)

function, and the coefficient k_r increases with the increase of n in a good logarithmic function, the coefficient λ increases linearly with n , and the correlation coefficients are all greater than 0.99.

Key words: weathered muddy siltstone; groundwater seepage; particle migration; mass loss

Citation format: WU L, SHI Y F, WANG C. Experimental study of particle migration mass loss in muddy siltstone under groundwater seepage effects[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 8–15.

风化泥质粉砂岩是一种常见的沉积岩,由于其特殊的物质组成和孔隙结构,对地下水的渗流和颗粒迁移具有重要影响^[1-4]。伴随地下水流动,风化泥质粉砂岩中的细小颗粒可能会发生迁移,从岩体中以溶解、蚀刷或沉积等方式流失,对岩体结构造成破坏。因此,对南昌地铁隧道下卧风化泥质粉砂岩中颗粒质量流失的研究具有重要的理论和实践意义。

达西定律描述了土体中水的渗流速度与水头损失之间的关系^[5],是研究渗流现象的基本定律。通过对达西定律的扩展研究,可以进一步理解岩土体中水的渗流行为。例如,Kogure^[6]进行了一系列试验,研究了不同水力梯度下岩石破碎体的渗透特性;Kumar等^[7]利用渗透装置重点研究了粗颗粒破碎岩石在非流动状态下的收敛速率,即达到稳态流动所需的时间。

近年来,有关地下水渗流作用下岩土体颗粒迁移质量损失的研究逐渐增多。Gelet等^[8]通过一系列渗流试验提出了颗粒迁移质量与水力梯度间的影响关系;He等^[9]通过自研渗流试验装置,分析了粗粒土中细颗粒迁移与渗透特性;Wang等^[10]、Cao等^[11]展开了钙质砂、红土等岩土体的渗流试验,探究了试样的渗流特性;张天军等^[12]通过渗透试验研究了不同初始孔隙度试样在不同初始水压梯度下砂砾流失的规律,并对渗透率在变质量渗透过程中对初始孔隙度的敏感性进行了分析;Zhang等^[13]、宋宜祥等^[14]、袁涛等^[15]利用自主研发的一种渗透仪,对不同级配的粗粒土试样进行了渗透变形全过程试验,探究了颗粒土的渗流变化机制;马丹等^[16]、吴疆宇等^[17]探讨了溶蚀作用对破碎岩体渗透特性的演化规律,并分析了在溶蚀作用下渗透压力以及岩样颗粒粒径对破碎岩体渗透特性的影响;张升等^[18]利

用理论和数值仿真方法,研究了颗粒在多孔介质中的迁移规律,并揭示了其与宏观规律之间的联系。

综上所述,根据对隧道病害的调查发现,在富水条件下,一些风化软岩在长期循环荷载作用下泥化并随水流失,力学性能显著降低,影响隧道结构稳定性。尽管上述学者在岩土体渗透变形和破坏机理方面的研究已取得一定的进展,但对于地下水位变化过程中,由渗流引起的风化泥质粉砂岩的孔隙度变化、颗粒迁移质量流失以及渗透参量之间的关系,仍然需要进一步深入研究。本文重点研究了地下水渗流作用下全风化泥质粉砂岩颗粒迁移质量流失问题,通过渗透试验对地下水流动过程中的颗粒迁移、颗粒稳定性和质量变化的影响进行了分析和探讨。

1 试验设备及方案

1.1 试样及试验设备

试验采用的岩样取自南昌某地铁车站施工现场的全风化泥质粉砂岩,该岩层埋深约28 m,层厚0.5 m,上覆砂砾层,下伏全风化泥质粉砂岩层,地下水埋深11 m。该范围内岩体风化强烈,颜色变化范围为砖红色至紫红色,岩石裂隙发育、松散破碎,表层多呈散体土状,所测试样基本物理力学指标详见表1。表1中: ρ 为试样天然密度; G_s 为试样比重; n_0 为试样初始孔隙度; v 为试样泊松比; c 为试样黏聚力; μ 为试样内摩擦角。

本文以达西定律为基础,并参考了《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),自制了一种泥质粉砂岩试样渗透试验装置,如图1所示。

考虑到全风化泥质粉砂岩的颗粒级配问题,取6种不同颗粒的直径(粒径):[0,0.075],[0.075,0.250],[0.25,0.50],[0.5,2.0],[2,5],[5,10] mm,如图2所示。

表1 试样基本物理力学指标
Tab.1 Basic physical and mechanical indexes of specimens

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	G_s	n_0	v	C/kPa	$\mu/(\text{°})$
2.12	2.65	0.32	0.35	32	21

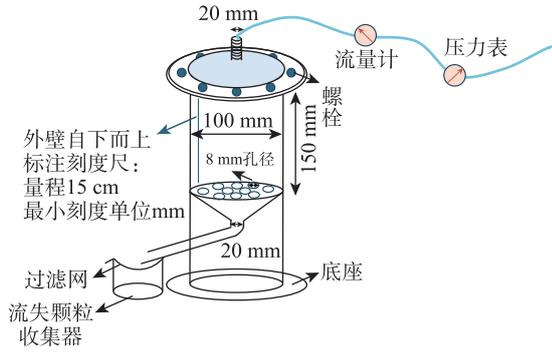


图1 渗透装置

Fig. 1 Penetration device

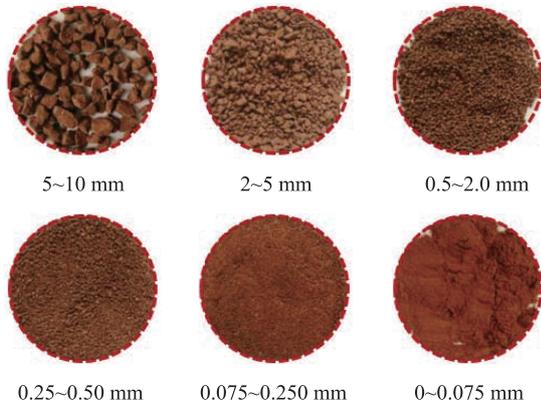


图2 不同粒径的全风化泥质粉砂岩颗粒

Fig. 2 Particles of completely weathered silty sandstone with different grain sizes

将6种不同粒径的泥质粉砂岩按照式(1),取Talbol幂指数(连续级配系数) n 分别为0.3, 0.5, 0.7进行配比。每缸装料总质量为1.5 kg,在半对数坐标中绘制理论级配曲线(图3),然后根据图解比例

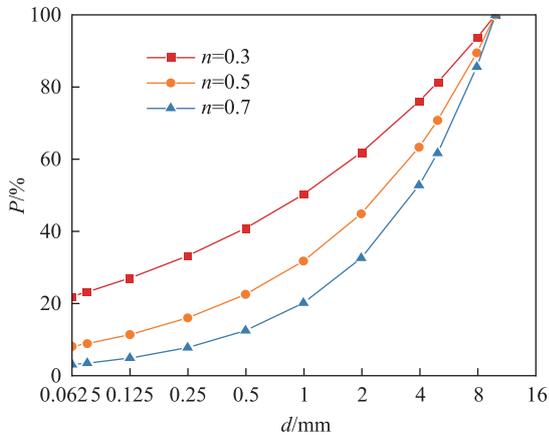


图3 理论级配曲线

Fig. 3 Theoretical gradation curve

计算得到实际各级配下的岩样质量。

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为破碎岩样各级粒径的通过率; d 为破碎岩样各级粒径,mm; D 为破碎岩样最大粒径,mm;对 n 取不同值可得到不同粒径的岩石颗粒。

1.2 试验方案

试验取3种不同的压实厚度 λ :0, 10, 20 mm,分别对应3种不同的初始孔隙度 ϕ_0 。该方案考虑了 n 和 λ 两个主要因素,共进行9组试验(如表2所示)。

表2 渗透试验设计方案

Tab.2 Penetration test design options

编号	n	λ /mm
1	0.3	0
2	0.3	10
3	0.3	20
4	0.5	0
5	0.5	10
6	0.5	20
7	0.7	0
8	0.7	10
9	0.7	20

将经过筛选的泥质粉砂岩样品放置在透明圆筒内,装填材料后计算试样的天然孔隙度 ϕ^* 。随后对岩样施加轴向载荷以监测其轴向位移,分别计算承载后岩样的高度及渗透前的 ϕ_0 。启动水泵,将水沿渗透管路注入渗透装置,随着水在管路中长时间持续流动,岩样中的原有细小颗粒和次生细小颗粒随水一起流出,及时收集流失的颗粒,烘干称重,并计算试样孔隙度 ϕ 。

通过安装在管路内的压力传感器实时监测并记录渗透水压力。由于岩样顶部与大气相通,因此岩样两端的压差即为传感器所读取的压力值。水流量则通过流量传感器进行测量。基于试样高度和渗透仪缸筒内半径,依据相关计算方法^[5],推导计算试样渗透率 k 。

在试验的早期阶段,通过高频采集流失的颗粒来估算质量损失。在试验中期和后期,每0.5 h测定一次流失的颗粒质量,并确保渗透试验持续时间不少于3 h。同时,持续监测并记录试验过程中的水压和流速。

2 试验结果及分析

2.1 质量流失率 q 的变化规律

图4显示了 q 随试验时间 t 的变化曲线。从图4(a)可以看出, $n=0.3$ 时,不同 λ 下的 q 在 10 min 内变化较快,在 10 min 附近达到峰值,随后逐渐减小,40 min 以后趋于平稳,表明试样质量流失集中在 10~40 min。当 λ 分别为 0, 10, 20 mm 时,对应 q 的峰值分别为 8.74, 18.09, 14.72 g/min。

从图4(b)可以看出, $n=0.5$ 时,不同 λ 下的 q 先增大后减小,在 5 min 时达到峰值,30 min 后逐渐趋于平稳。当 λ 分别为 0, 10, 20 mm 时,对应 q 的峰值分别为 5.44, 8.08, 9.65 g/min。

q 随 λ 的增加而增大,这是因为 λ 增加,试样空间挤密, ϕ_0 减小,渗透性变差,试样两端渗透压差增大,导致装置水压增大,水压达阈值后释放能量使大量细小颗粒在较短时间内迁移流失,对应 q 的峰值增大。 $n=0.3$ 时, q 的峰值随 λ 先增大后减小,原因是试样渗透性过差,水压无法达到阈值。

从图4(c)可以看出, $n=0.7$ 时,不同 λ 下的 q 随 t 的变化趋势与图4(b)相似,在 5 min 时达到峰值,25 min 后逐渐趋于平稳。当 λ 分别为 0, 10, 20 mm 时,对应 q 的峰值分别为 2.82, 4.03, 5.36 g/min。

随着 n 增加, q 的峰值减小,这是因为 n 增加,试样的细颗粒所占比例下降,试样密实性变差,渗透性变强,试样两端渗透压差变小,较小的水压无法积聚足够的能量使得大量细小颗粒迁移流失。 n 增加,达到 q 的峰值所需时间减少,这同样是因为试样渗透性变强,且试验水压有限, $n>0.5$ 后 q 的峰值所需时间变化不明显。

2.2 孔隙度变化率 ϕ' 的变化规律

图5显示了 ϕ' 与 t 的关系曲线。从图5(a)可以看出, $n=0.3$ 时,不同 λ 下的 ϕ' 先增大后减小,在 10 min 时达到峰值,30 min 后逐渐趋于平稳,对应 ϕ' 的基本保持不变。当 λ 分别为 0, 10, 20 mm 时,对应的 ϕ' 分别为 0.007 6, 0.006 2, 0.002 1 min^{-1} 。

从图5(b)和图5(c)可以看出, $n=0.5$ 和 0.7 时,不同 λ 下的 ϕ' 随 t 增大而不断减小,曲线在 20 min 内

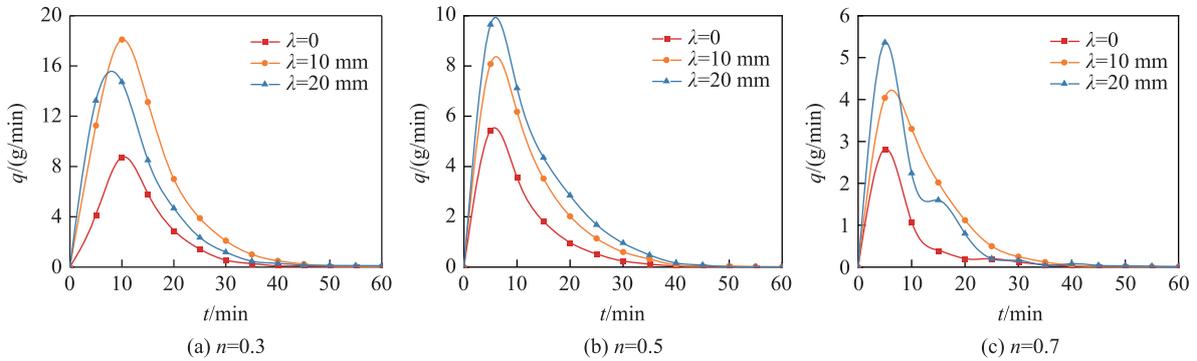


图4 质量流失率随时间变化的曲线
Fig. 4 Curve of mass loss rate with time variation

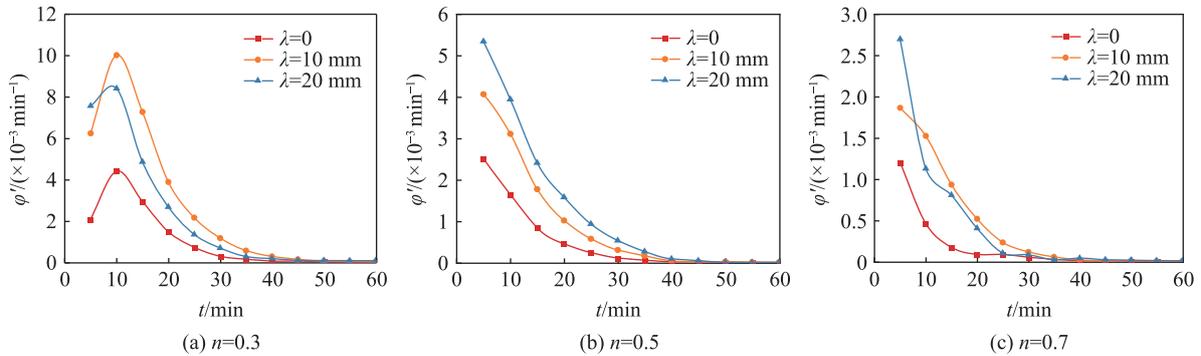


图5 孔隙度变化率随时间变化的曲线
Fig. 5 Curve of porosity variation rate with time variation

的变化较快,在20 min后逐渐缓慢减小并趋于水平。曲线变化幅度随 λ 增加而增大。 $n=0.5$ 时 φ' 的峰值为 0.0053 min^{-1} , $n=0.7$ 时 φ' 的峰值为 0.0027 min^{-1} ,二者均出现在渗透5 min时刻,此时对应的 λ 为20 mm。 n 减小,试样中细颗粒物的比例降低, φ 变化幅度增大。

与图5(b)和图5(c)相比,图5(a)中曲线变化趋势并非持续下降,而是先增加后减小再趋于平缓,其 φ 的峰值发生时刻较上述两组曲线滞后5 min,且对应的 λ 为10 mm。由此推断, $n=0.3$ 时,试样中细颗粒比例上升,试样空间挤密, φ_0 减小。随着水的渗透作用,大量细小颗粒在较短时间内发生迁移流失,导致 φ 的变化幅度增大。

3 试验中参数关系分析

3.1 q 与 φ 及 t 的关系

图6显示了 q 与 φ 及 t 的关系曲线。从图6可以看出, q 在 t 和 φ 的共同影响下,曲线呈类似对数型逐渐下降,30 min后,基本趋于平稳。受级配影响, $n=0.3$ 时, q 与 φ 在5~10 min呈增大趋势。根据试验现象推断可知, n 减小,试样中细颗粒与粗颗粒所占比值差异也就增大,细小颗粒挤密填充大块粒径空间,导致试样 φ_0 减小。在水的渗流作用下,水压积聚一段时间,冲开大块粒径,空间暴露,大量细小颗粒在较短时间内发生迁移流失,导致 q 与 φ 变化幅度增大。

3.2 k 与 φ 及 t 的关系

图7显示了 k 与 φ 及 t 的关系曲线。图7中曲线呈类似幂指数函数型逐渐上升,随着 t 的增加, φ 不断增大, k 也随之逐渐增大,30 min后,变化幅度基本趋于平稳。受级配影响,随着 n 增加,不同时段内的 k 也在随 φ 的增大而不断增大。根据试验现象推断, k 与 φ 成正相关关系,即 φ 增大, k 增大。这是因为更多的孔隙空间为流体渗透提供了更多通道。此外,在本次试验中, k 还受 n 的影响, n 增加, k 增大,流体渗透速度增大, k 达到峰值对应的 t 减少。

3.3 考虑 n 及 φ 影响的参数关系

根据王路珍等^[19]、周祥^[20]的研究,渗透试验中 k 与 φ 呈幂指数函数关系,结合本文渗透试验数据,假设风化泥质粉砂岩的 k 与 φ 存在以下关系

$$k = k_r \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^{\lambda_r} \quad (2)$$

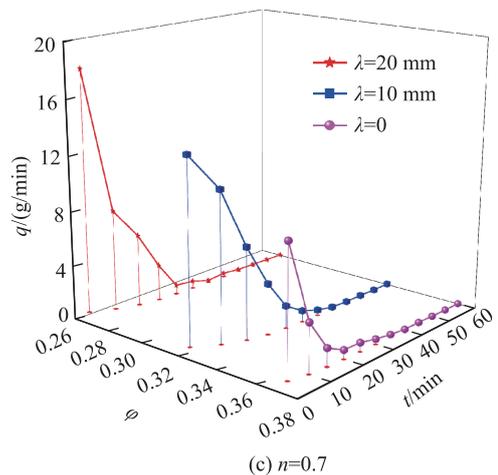
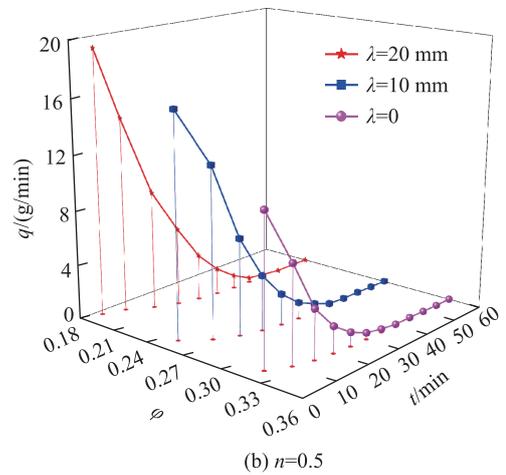
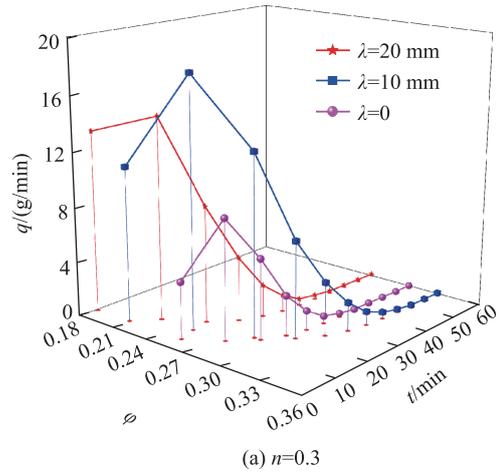
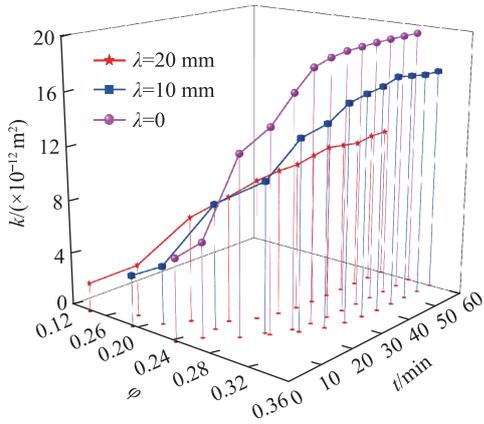


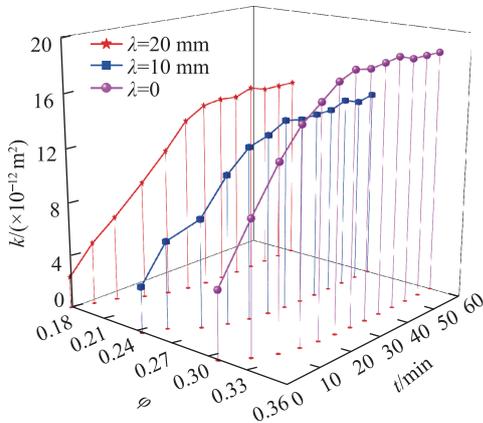
图6 质量流失率与孔隙度及时间关系曲线
Fig. 6 Quality loss rate, porosity and time relationship curve

式中: k_r, λ_r 均为相关系数。

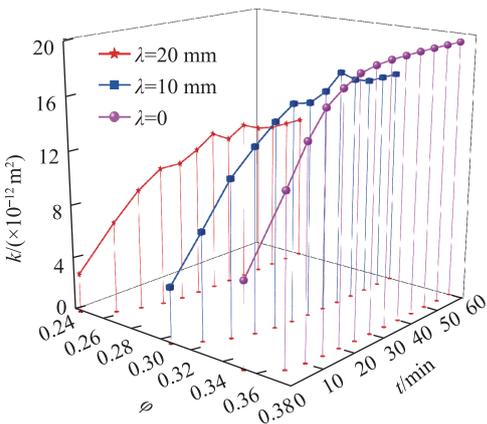
式(2)中的渗透系数 k_r, λ_r 与 n 的关系如图8和图9。从图8可以看出,渗透系数 k_r 随着 n 增加呈良



(a) $n=0.3$



(b) $n=0.5$



(c) $n=0.7$

图7 渗透率与孔隙度及时间关系曲线

Fig. 7 The penetration rate, porosity and time relationship curve

好的对数型函数趋势增大;从图9可以看出,渗透系数 λ_r 则随 n 呈线性增大,相关系数均大于0.99。因此,可建立考虑 n 及 φ 等综合因素影响的渗透归一化关系式

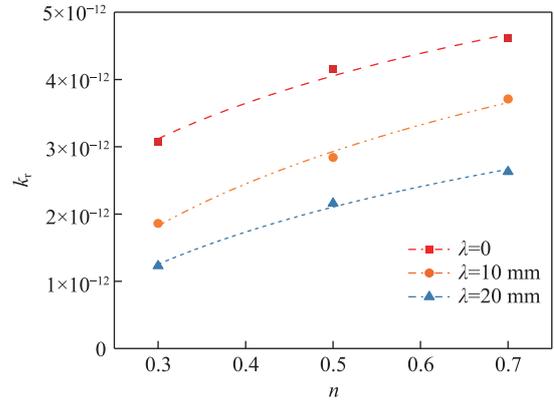


图8 渗透系数 k_r 与Talbol幂指数的关系

Fig. 8 The relationship between the relative permeability coefficient k_r and the Talbol power index

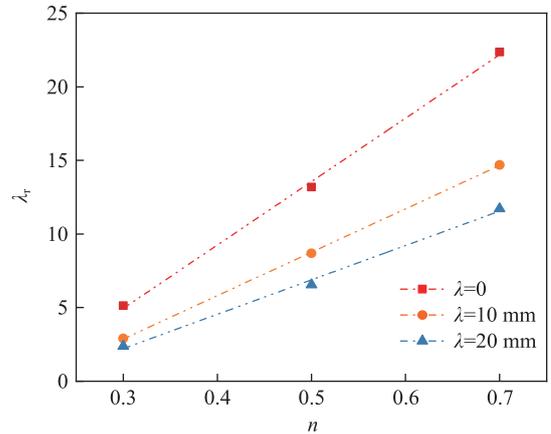


图9 渗透系数 λ_r 与Talbol幂指数的关系

Fig. 9 The relationship between the relative permeability coefficient λ_r and the Talbol power index

$$k = (\alpha \ln n + \beta) \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^{(an+b)} \quad (3)$$

式中: α, β, a, b 均为 n 的相关系数。

4 结论

1) 不同 λ 下的 q 随 t 呈先增大后减小的趋势,在5~10 min内达到峰值,30 min后逐渐趋于平稳。试验结果表明, λ 增加, φ_0 减小,渗透性变差,试样两端渗透压差增大,水压积聚较大能量,使大量细小颗粒在较短时间内迁移流失。

2) n 减小,试样中细颗粒比例上升, φ 变化幅度增大。各组试样 φ 在前10~20 min内变化较快,表明该时间段内质量流失较多;20 min之后, φ 缓慢增大,表明 q 减小。

3) k 与 φ 呈正相关关系,即 φ 增大, k 增大。此外, k 还受 n 的影响, n 增加, k 增大,流体渗透速度增大, k 达到峰值对应的 t 减少。

4) k 受 φ 和 n 的共同影响, k 与 φ 呈幂指数函数关系, k 着 n 的增加呈良好的对数型函数趋势增大,而 λ 则随 n 呈线性增大,相关系数均大于0.99。因此,可建立考虑 n 及 φ 等综合因素影响的渗透归一化关系式。

参考文献:

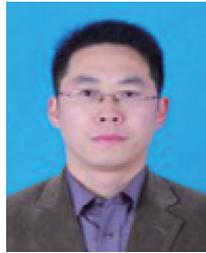
- [1] 石钰锋,曹成威,谈亦帆,等.地铁隧道基底饱水风化软岩动力响应及长期沉降研究[J].现代隧道技术,2022,59(2):86-95.
SHI Y F, CAO C W, TAN Y F, et al. Study on dynamic response and long-term settlement of water-saturated weathered soft rocks at the base of subway tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(2): 86-95.
- [2] 谈亦帆,石钰锋,徐长节,等.地铁隧道基底饱水风化软岩动力特性试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(6):33-41.
TAN Y F, SHI Y F, XU C J, et al. Experimental study on dynamic characteristics of saturated and weathered soft rock in metro tunnel basement[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 33-41.
- [3] 余超,黄展军,赵秀绍,等.循环荷载下地铁隧道基底风化泥质粉砂岩动力特性研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):366-374.
YU C, HUANG Z J, ZHAO X S, et al. Dynamic characteristics of weathered argillaceous siltstone under cyclic loading in subway tunnel base[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 366-374.
- [4] 孙洋,张承客,李志强,等.循环动荷载作用下中风化泥质粉砂岩变形特性试验研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(S2):268-273.
SUN Y, ZHANG C K, LI Z Q, et al. Experimental study on deformation characteristics of moderately weathered argillaceous siltstone under cyclic dynamic loading[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 268-273.
- [5] 王路珍.变质量破碎泥岩渗透性的加速试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
WANG L Z. Accelerated experimental study on permeability of broken mudstone with mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [6] KOGURE K. Experimental study on permeability of crushed rock[J]. Memoirs of the Defense Academy, 1976, 16(4): 149-154.
- [7] KUMAR P G N, VENKATARAMAN P. Non-darcy converging flow through coarse granular media[J]. Journal of the Institution of Engineers, 1995, 76: 6-11.
- [8] GELET R, MAROT D. Internal erosion by suffusion on cohesionless gap-graded soils: model and sensibility analysis[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2022, 31: 100313.
- [9] HE T, MAO H, YANG G B. Experimental study on the migration and clogging of fine particles in coarse-grained soil with seepage[J]. KSCE journal of civil engineering, 2024, 28(2): 596-608.
- [10] WANG Z, SHENG J, WANG Q, et al. Experimental study on vertical seepage of coarse-grained calcareous sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 181: 108661.
- [11] CAO D, FAYOU A, LI Y, et al. Characterization of the migration of soil particles in lateritic soils under the effect of rainfall[J]. Applied Sciences, 2023, 13(22): 12292.
- [12] 张天军,李洋,庞明坤,等.砾石含水层中质量流失对孔隙渗透率的影响[J].煤炭学报,2022,47(6):2360-2368.
ZHANG T J, LI Y, PANG M K, et al. Effect of mass loss on pore permeability in gravel aquifers[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2360-2368.
- [13] ZHANG B Y, LIN Z B. Seepage property of crushed mudstone rock in collapse column[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 9: 1-10.
- [14] 宋宜祥,管景华,李彦奇,等.反粒序砂土体内侵蚀及渗流特性变化规律试验研究[J].地质科技通报,2023,42(3):16-27.
SONG Y X, GUAN J H, LI Y Q, et al. Experimental study on the change law of internal erosion and seepage characteristics of inverse grading sand accumulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 16-27.
- [15] 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.
YUAN T, JIANG Z M, LIU D Q, et al. Experiment on the seepage damage coarse grain soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1311-1316.
- [16] 马丹,段宏宇,张吉雄,等.断层破碎带岩体突水灾害的蠕变-冲蚀耦合力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(9):1751-1763.
MA D, DUAN H Y, ZHANG J X, et al. Experimental investigation of creep-erosion coupling mechanical properties of water inrush hazards in fault fracture rock masses

- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1751-1763.
- [17] 吴疆宇,冯梅梅,陈占清,等.溶蚀作用对破碎泥岩渗透特性的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(2):117-125.
WU J Y, FENG M M, CHEN Z Q, et al. Dissolution effects on the seepage property of broken mudstone[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(2): 117-125.
- [18] 张升,张桐,苏晶晶,等.多孔介质中颗粒迁移细观理论与数值研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(6):2103-2111.
ZHANG S, ZHANG T, SU J J, et al. Mesoscopic theoretical and numerical study of particle migration in porous media[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2103-2111.
- [19] 王路珍,陈占清,孔海陵,等.渗透压力和初始孔隙度对破碎泥岩变质量渗流影响的试验研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(03):462-468.
WANG L Z, CHEN Z Q, KONG H L, et al. An experimental study of the influence of seepage pressure and initial porosity on variable mass seepage for broken mudstone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(03): 462-468.
- [20] 周祥.不同泥质含量砂岩三轴渗透试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(1):84-90.

ZHOU X. An experimental study on permeability of sandstone with different shale contents under 3-D stress conditions[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(1): 84-90.



第一作者:吴浪(2001—),男,硕士研究生,研究方向为隧道与地下工程。E-mail:18279252642@163.com。



通信作者:石钰锋(1985—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为隧道与地下工程。E-mail:s074811156@126.com。

(责任编辑:姜红贵)