

细颗粒含量对极细砂渗透性的影响规律和细观机理

唐 凯¹, 郭 丹¹, 沈才华², 乔晓龙³, 王业钊²

(1. 保利长大海外工程有限公司, 广东 广州 510623; 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;
3. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为探究细颗粒含量对海洋极细砂渗透性的影响规律和细观机理,采用筛分法结合激光粒度仪分析了毛里塔尼亚海岸极细砂的颗粒级配,参照颗粒级配结果在室内配置不同细颗粒含量的极细砂进行变水头渗透试验,并采用扫描电镜技术初步探讨了细颗粒含量对极细砂渗透系数的影响机理。结果表明:细颗粒含量在微细观上改变了极细砂的孔隙分布结构和整体性,从而对渗透系数产生影响;粉细砂($d=0.075\sim0.1\text{ mm}$)含量对极细砂饱和渗透系数 k_{20} 的影响较小,呈线性相关,其含量(质量分数)每增加5%, k_{20} 约减小 $0.2\times10^{-3}\text{ cm/s}$;细粒($d\leq0.075\text{ mm}$)含量对 k_{20} 影响较大,呈先降低后稳定的幂函数变化规律; k_{20} 与极细砂颗粒级配状态参数(不均匀系数和曲率系数)的关系用幂函数表达更为准确。

关键词:极细砂;细颗粒含量;渗透系数;不均匀系数;曲率系数
中图分类号:TU521.1;TU441 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)06-0046-06

Influence rule of fine particle content on sand permeability and its mesoscopic mechanism//TANG Kai¹, GUO Dan¹, SHEN Caihua², QIAO Xiaolong³, WANG Yezhao²(1. Poly Changda Overseas Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510623, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to explore the influence rule of fine particle content on the permeability of ocean ultra-fine sands and the meso-mechanism, the particle gradation of the ultra-fine sands from the coast of Mauritania was analyzed by a sieving method combined with laser particle size analyzer. According to the results of the particle gradation, the ultra-fine sands with different fine particle contents were configured indoor for variable head penetration test. Finally, combined with the SEM technology, the influence mechanism of permeability coefficient of fine particle content on ultra-fine sands was preliminarily explored. The results show that the content of fine particles changes the pore distribution structure of ultra-fine sands and the integrity of the sample in the microscopic view, thereby affecting the permeability coefficient. The content of silt fine sands ($d=0.075\sim0.1\text{ mm}$) has minor effect on the saturated permeability coefficient k_{20} of ultra-fine sands, and is linearly related. The content increases by 5%, k_{20} decreases by about $0.2\times10^{-3}\text{ cm/s}$. The content of fine particles ($d\leq0.075\text{ mm}$) has a relatively large influence on k_{20} , showing a power function that first decreases and then stabilizes. The relationship between k_{20} and the fine sand gradation state parameters C_u and C_c is more accurately expressed by a power function.

Key words: very fine sand; fine particle content; permeability coefficient; non-uniformity coefficient; curvature coefficient

粒径较小的砂土如粉细砂、极细砂具有渗透稳定性差、渗透系数受粒径影响大、渗流作用下细颗粒易流失的特点,它在天然土层中的含量对工程安全具有重要影响,对于土层中存在这类细砂层的工程,在地下水的作用下,易产生流砂、涌砂,进而发生滑坡、坍塌、支护结构破坏等现象^[1-2]。因此,有关粒径较小的砂土渗透性的研究一直是热点研究课题。

对于不同级配、不同颗粒形状以及不同地区砂土的饱和渗透性的研究已有很多成果,这对探讨极细砂的饱和渗透性具有重要指导意义。孔令伟

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41830110);保利集团科技项目(20198133316);中交养护集团2020年重大科技研发项目(27100020Y249)

作者简介:唐凯(1989—),男,工程师,主要从事土木工程研究。E-mail: 550581863@qq.com
通信作者:沈才华(1976—),男,副研究员,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail: shencaihoa@163.com

等^[3]通过室内试验,发现砂土的饱和渗透系数随细粒含量(质量分数,下同)的增加而减小,并且在细粒含量为5%、5%~10%、25%时有显著区别。齐俊修等^[4]统计分析了50余个细砂试样的物理性质及相应的渗透系数,发现当细砂干密度在1.36~1.93 g/cm³时,其渗透系数主要分布在(8~3.0)×10⁻³ cm/s 区间内。石宇涵^[5]对粉细砂进行的渗透试验和颗分试验结果表明,粉细砂粒径较小,骨架颗粒之间的孔隙被细颗粒填充,使得试样密度增大,孔隙率降低,渗透性减弱。史志敏^[6]通过试验研究发现,砂土的平均粒径有一个临界值0.37 mm,超过该值后,平均粒径对砂土饱和渗透性的影响尤其显著。张翔^[7]对砂土渗流过程中的颗粒流失情况进行了试验研究,发现当土体中的细颗粒含量小于35%时,细颗粒易在渗流作用下从粗颗粒骨架间的孔隙中流失,细颗粒含量为35%时土体最为稳定。Ueng等^[8]对细砂液化过程中的渗透系数进行了试验研究,发现液化区的渗透系数随着向上流速的增大而增大。Xu等^[9]通过室内模型试验研究了Ca²⁺浓度对砂-膨润土渗透性的影响,结果表明Ca²⁺浓度对混合土的渗透特性有较大的影响,土体会在化学反应的作用下发生转化,从而降低土体的防渗性能。

在海岸港口工程中,富含极细砂的土层在遇外力作用后易产生隆起、沉降、骤淤等现象,导致这类地质条件下的海岸港口工程施工难度较高^[10]。由于试验条件等限制,目前细颗粒含量对极细砂土层渗透特性、工程安全特性等方面的研究还不成熟,理论体系尚不完善。为此,本文基于毛里塔尼亚港池建设M201项目,从工程现场取回极细砂样本(以下简称“砂样”)进行颗粒级配试验,考虑到沿海岸沙滩的空间不均匀分布特性,采用相应级配的室内配置砂进行渗透试验,研究不同细颗粒组成对极细砂饱和渗透性的影响规律,并采用扫描电镜技术初步探讨了细颗粒含量对极细砂渗透性的影响机理。

1 砂样颗粒级配及砂粒成分分析

针对毛里塔尼亚工程现场取回的砂样,根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行颗粒筛分试验,试样细度模数均值为0.838 348,质量损失率为0.1229%。筛底粒径小于0.16 mm的颗粒占总质量的20.2%,已大于1%,需要对粒径小于0.16 mm的细颗粒继续进行粒径分析。依据GB/T 19077—2016《粒度分布激光衍射法》,采用BT-9300S型激光粒度分布仪对细颗粒进行粒径分析,采用湿法制样,液体分散介质为蒸馏水,光学模式为Mie模式。为了提高测试精度,第一次测试添

加少量砂样(2 g)进行分析,测试完再添加2 g砂样进行测试,总共进行5次测试,共添加砂样10 g,取5次测试结果的平均值,得到砂样的颗粒级配曲线如图1所示。

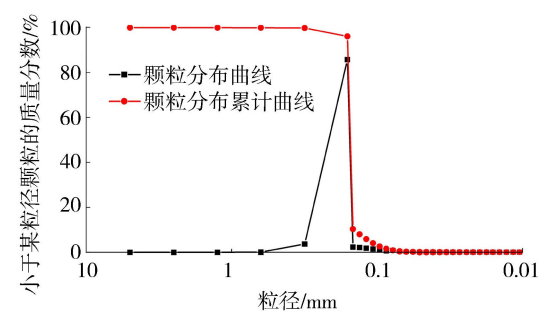


图1 砂样颗粒级配曲线

为更好地描述砂样的粒径范围及粒度组成,本文在GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》的基础上,结合王瑞东等^[11-13]的研究成果,将粒径在0.05~0.25 mm范围的砂统称为极细砂,并根据标准土壤细筛的筛孔直径(从大到小分别为2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm和0.075 mm),利用不同筛孔直径标准筛的对应目数,对砂样的粒径区间和颗粒做进一步划分。根据图1,砂样的组分中,粗砂($d=1\sim2$ mm)约占总质量的0.0355%,中砂($d=0.5\sim1$ mm)约占0.1416%,中细砂($d=0.25\sim0.5$ mm)约占3.7%,细砂($d=0.1\sim0.25$ mm)约占93.372%,粉细砂($d=0.075\sim0.1$ mm)约占2.117%,细粒($d\leq0.075$ mm)约占0.6336%。

从图1可以看出,本工程砂样的粒径级配过于集中,呈明显的台阶状,其粒径主要分布于0.1~0.16 mm范围内。由图1可得限制粒径 $d_{60}=0.15353$ mm,中值粒径 $d_{30}=0.14844$ mm,有效粒径 $d_{10}=0.13441$ mm;根据砂样的不均匀系数和曲率系数综合判定后认为该砂样级配不良。

针对砂样主要细砂颗粒采用扫描电镜(Nova Nano SEM45型扫描电镜仪)进行砂粒成分分析,结果表明砂粒成分主要是SiO₂,其中硅和氧的质量占比达96.2%,主要是因为大西洋东岸为洋流冲刷型,后方为风化的沙漠,因此砂粒的成分相对比较单一。图2为主要细砂颗粒的扫描电镜图。

2 不同细颗粒含量极细砂饱和渗透性试验

由于砂层成因和环境不同,通常沿海岸线极细砂的细颗粒含量会不同,如我国山东威海银滩的砂粒相对较细,因此有必要针对不同细颗粒含量的极细砂渗透性进行研究。极细砂属细粒土,因此按GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行室内变水头渗透试验。

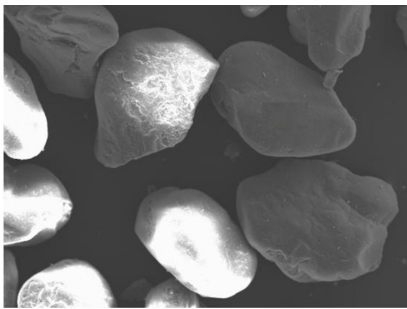


图2 主要细砂颗粒的扫描电镜结果

2.1 试验方案

毛里塔尼亚港池建设 M201 项目富含极细砂的砂层级配非常复杂,为了进行细颗粒含量对渗透性影响机理分析,根据砂样的颗粒级配曲线对试验用砂进行室内配置。为同时控制试验的系统误差,在极细砂的配置过程中,不考虑中砂、中细砂含量的影响,将这两种粒径的砂含量固定(分别为 0.18% 和 0.37%),以探讨粉细砂(方案 1)和细粒(方案 2)含量对极细砂渗透特性的影响规律。试验方案如表 1 所示,每组试验均制作 3 组平行试样,最终试验结果取平均值。

表 1 试验方案

试验组次	方案 1 配比/%			方案 2 配比/%		
	细砂	粉细砂	细粒	细砂	粉细砂	细粒
1	90.49	5.00	0.63	91.00	2.12	3.00
2	85.49	10.00	0.63	89.00	2.12	5.00
3	80.49	15.00	0.63	84.00	2.12	10.00
4	75.49	20.00	0.63	79.00	2.12	15.00
5	65.49	30.00	0.63	74.00	2.12	20.00
6				64.00	2.12	30.00

2.2 试验材料及制样

2.2.1 试验材料

配置砂原材料取自青岛市黄岛区金沙滩海滨附近地表处的海砂,在室内进行筛分后保留粒径 0.25 ~ 0.5 mm 的中细砂和 0.1 ~ 0.25 mm 的细砂;由于金沙滩海滨地表的海砂中粒径大于 0.1 mm 的颗粒占总质量的 90% 以上,粉细砂和细粒极少,所以粉细砂和细粒采用机制石英粉进行补充,所用材料如图 3 所示。

2.2.2 试样制备

试样均采用湿法制作,该方法可较好地控制试样的孔隙比,并可减少制样方法对土体形状的影响,由于砂土颗粒在水的作用下可形成似黏聚力,因此制样和装样可以顺利进行。制样前将一定质量的水和砂样充分搅拌均匀,在密封袋内静置一昼夜(24 h)。对密封袋内不同位置的试样测定含水率,确保差值不超过 1% 后方可制样。试样的制备采用击实法,制样完成后采用变水头渗透仪测量饱和渗透

系数 k_{20} 。制备好的试样如图 4 所示。



(a) 中细砂



(b) 细砂

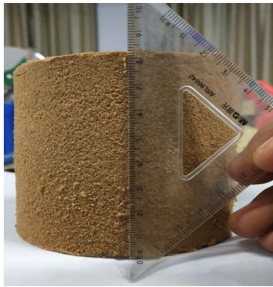


(c) 粉细砂



(d) 细粒

图3 室内配置砂的原材料



(a) 脱模后的试样



(b) 试样尺寸



(c) 环刀切削好的试样

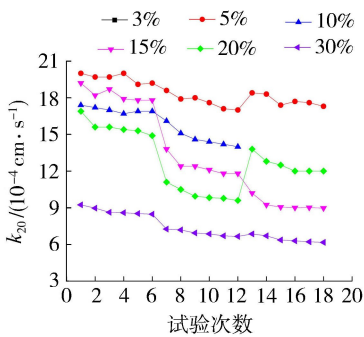
图4 制备好的试样

2.3 试验结果分析

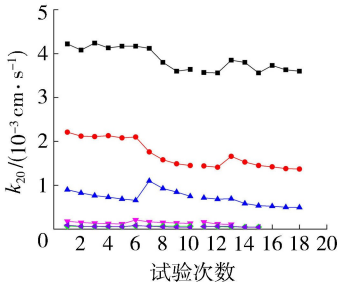
2.3.1 饱和渗透系数与细颗粒含量的关系

变水头渗透试验用水为清水,水温为 13℃,需要根据水的动力黏滞系数和温度校正值得^[11]对所测得的饱和渗透系数进行换算,结果见图 5。

从图 5 可以发现,相对于细粒,粉细砂含量对试样的渗透性影响较小,直到粉细砂的含量达到 30% 时才改变了一个数量级,而细粒含量达到 15% 时其饱和渗透系数即改变了一个数量级。随着粉细砂含量的提高,试样饱和渗透系数呈持续减小的趋势,当粉细砂含量为 15% ~ 20% 时,同一试验组次的不同试样的饱和渗透系数有所不同,数据振幅较大,部分



(a) 不同粉细砂含量

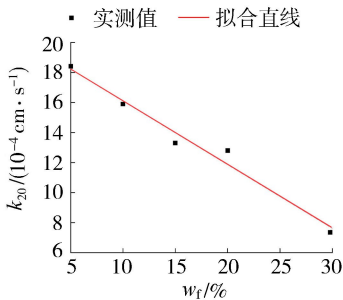


(b) 不同细粒含量

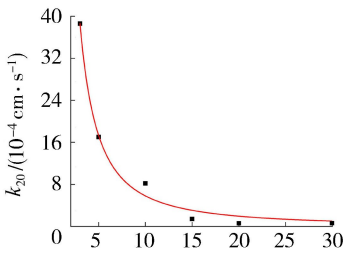
图5 不同细颗粒含量试样的饱和渗透系数时程曲线

数据交叉,但不影响总体变化规律。随着细粒含量的提高,试样的渗透性先显著下降,在细粒含量达到15%以后,试样的渗透性降低一个数量级并趋于稳定,数据的振幅较小,总体变化规律明显。

取每组试验试样饱和渗透系数的所有数据的平均值进行拟合,可得到试样饱和渗透系数随粉细砂和细粒含量改变的变化规律,如图6所示。



(a) 不同粉细砂含量



(b) 不同细粒含量

图6 试样饱和渗透系数随不同细颗粒含量的变化曲线

从图6可以发现,试样的饱和渗透系数随粉细砂含量的增加而持续下降,但差距不大,粉细砂的含量每增加5%,其饱和渗透系数约减小 $0.2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,说明粉细砂含量的变化对试样整体饱和渗透系数的

影响较小。试样的饱和渗透系数随细粒含量的增加呈先下降后稳定的趋势,其数据变化明显,并在细粒含量达到10%时改变数量级;饱和渗透系数的变化趋势大致可分为快速下降和平稳两个阶段,细粒含量15%为饱和渗透系数变化的分界点,饱和渗透系数稳定后约比原砂减小两个数量级,孔令伟等^[3,12-14]在对粉细砂和钙质砂试验中观察到相同的规律,与本文所得结果基本一致。

整体而言,极细砂的饱和渗透系数随粉细砂和细粒含量的变化规律分别为线性变化和幂函数变化,拟合公式分别为

$$k_{20} = 0.00203 - 4.236^{-5} w_f \quad (R^2 = 0.97818) \quad (1)$$

$$k_{20} = 0.02174 w_x^{-1.5728} \quad (R^2 = 0.99060) \quad (2)$$

式中 w_f 、 w_x 分别为粉细砂和细粒的含量。两种拟合曲线的 R^2 均达到0.97以上,拟合效果较好。

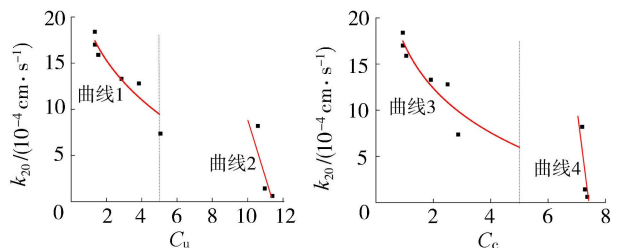
2.3.2 饱和渗透系数与颗粒级配状态参数的关系

极细砂的饱和渗透系数与细颗粒的含量有显著关系,而粉细砂和细粒含量的变化会直接导致极细砂的颗粒级配发生改变。一般而言,颗粒级配均采用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来联合表示。不同试验方案的渗透系数与颗粒级配状态参数见表2。

表2 不同试验方案的颗粒级配状态参数与饱和渗透系数

试验方案	试验组次	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{60}/mm	C_u	C_c	$k_{20}/(10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$
方案1	1	0.07981	0.08989	0.10758	1.34795	0.94110	18.40
	2	0.06866	0.08792	0.10608	1.54500	1.06130	15.90
	3	0.03661	0.08569	0.10461	2.85742	1.91729	13.30
	4	0.02682	0.08313	0.10304	3.84191	2.50064	12.80
	5	0.01957	0.07459	0.09903	5.06030	2.87080	7.37
方案2	1	0.08007	0.09017	0.10776	1.34582	0.94232	38.60
	2	0.07916	0.08946	0.10727	1.35510	0.94248	17.00
	3	0.01000	0.08723	0.10581	10.58100	7.19126	8.20
	4	0.00950	0.08497	0.10425	10.97368	7.29007	1.43
	5	0.00900	0.08249	0.10260	11.40000	7.36907	0.60
	6	0.00850	0.01000	0.09847	11.58471	0.11948	0.60

将表2中所有试验数据整理并摒弃异常数据点后,可以得到不同级配极细砂的饱和渗透系数与颗粒级配状态参数的关系如图7所示。表2和图7分析显示,当 C_u 较大时,饱和渗透系数 k_{20} 与 C_u 、 C_c 呈



(a) k_{20} 与 C_u 的关系

(b) k_{20} 与 C_c 的关系

图7 极细砂饱和渗透系数与颗粒级配状态参数的关系

近似线性关系;当 $C_u < 5$ 时, k_{20} 与 C_u 和 C_c 之间存在幂函数关系,拟合公式为

$$k_{20} = 0.011535 - 0.00087C_u^{0.26822} - 0.000887C_c^{0.0377} \quad (C_u < 5) \quad (3)$$

在张宜健等^[15-16]对钙质砂、粗砂、粉砂的研究中,不同粒径砂的渗透系数与不均匀系数和曲率系数之间均拟合为线性关系,但从本文极细砂试验结果来看,不同粒径砂的饱和渗透系数与不均匀系数和曲率系数之间的关系用非线性幂函数表示更为准确。因此,建议不均匀系数不大时采用幂函数来表达极细砂饱和渗透系数和其颗粒级配状态参数之间的关系。

3 细颗粒含量对极细砂渗透性影响的细观机理

与粉细砂含量对极细砂的渗透系数影响相比,细粒含量对极细砂的渗透系数影响较为明显,观察不同细粒含量的细观变化更易得出细颗粒含量对极细砂渗透性影响的细观机理。为了探究不同细粒含量时极细砂宏观渗透系数的变化机理,对 0.25 mm 以下的试验材料观察其细观形貌,并选取渗透试验中细粒含量分别为 5%、10%、15%、20%、30% 的砂样进行扫描电镜分析,观测用砂采用导电胶粘在观测板上并轻轻压实,扫描前对试样进行喷金。0.25 mm 以下的试验材料细观形貌如图 8 所示,不同细粒含量试样的细观结构如图 9 所示。

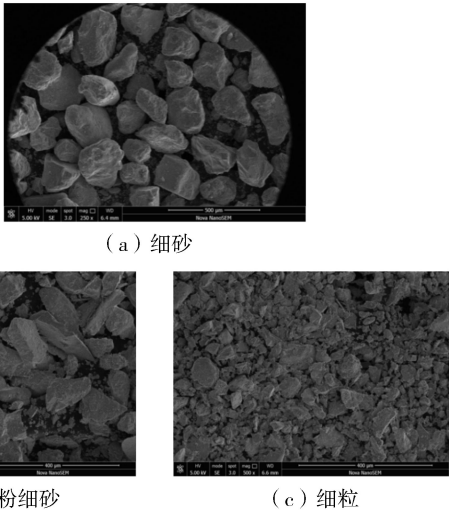
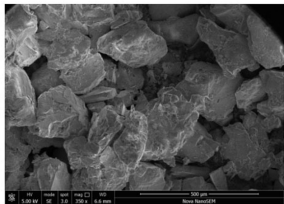
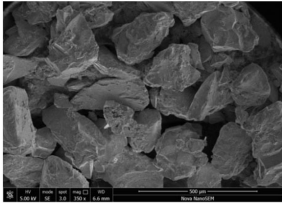


图 8 细颗粒的细观形貌

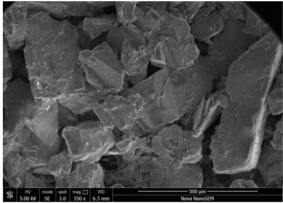
观察图 8 可以发现,当颗粒粒径较大时,颗粒的分布较为均匀,颗粒较为圆滑,形状更规则,颗粒间隙较大;随着颗粒粒径的减小,颗粒逐渐变得不规则,尖锐的棱角较多,颗粒间隙更小。在这种情况下,当不同粒径级的颗粒混合到一起时,细颗粒更容易分布在粗颗粒形成的骨架孔隙中,并且粗颗粒与



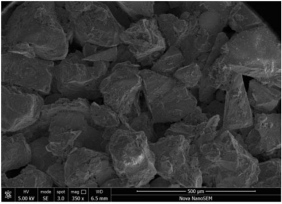
(a) 细粒含量5%



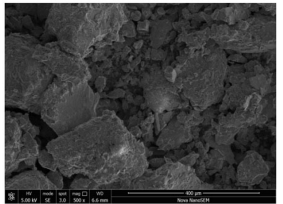
(b) 细粒含量10%



(c) 细粒含量15%



(d) 细粒含量20%



(e) 细粒含量30%

图 9 不同细粒含量极细砂的细观形貌

细颗粒之间易相互勾嵌连接形成不同的整体结构,从而影响其结构性和渗透系数。

由图 9 可见,当细粒含量较小(5% ~ 10%)时,粗颗粒间具有明显的孔隙,孔隙中少有细颗粒存在,粗颗粒骨架之间的孔隙几乎没有被细颗粒充填,此时少量的细颗粒并未受到四周环境的约束或限制,其自身具有良好的自由度,可能在渗流作用下发生运移甚至流失,从而导致土体细观结构重组,孔隙结构产生改变,因此其渗透系数变化较为明显;当细粒含量达到 15% 时,粗颗粒间的孔隙明显减小,可以明显观察到有细颗粒填充于粗颗粒的孔隙中,孔隙被细颗粒填充后,水流途径被阻塞或堵塞,导致渗透系数明显减小,产生宏观渗透系数降低一个数量级的现象;当细粒含量大于 15% 以后,粗颗粒骨架之间的孔隙得到充分充填,只留下了少许的毛细孔隙,同时不规则的细颗粒和粗颗粒之间相互勾嵌,形成致密且稳定的结构,细颗粒受到约束,自由度大大降低,难以自由运移,此时在渗流作用下砂土的整体结构保持较完整,这就使得渗透系数进一步减小,细颗粒流失的程度大大降低。所以当细粒含量大于 15% 后,出现图 6 中渗透系数趋于稳定的现象。

4 结 论

a. 极细砂的饱和渗透系数 k_{20} 随粉细砂含量增大呈线性减小变化规律,粉细砂的含量每增加 5%, k_{20} 约减小 $0.2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, k_{20} 随细粒含量增大呈先降低后稳定的幂函数变化规律,两种拟合关系式的 R^2

均达到 0.97 以上,拟合效果较好。

b. k_{20} 与极细砂的颗粒级配状态参数之间存在显著联系,当 $C_u < 5$ 时, k_{20} 和 C_u 、 C_c 之间关系用幂函数表达更为准确,并通过计算得到极细砂饱和渗透系数计算的经验公式。

c. 细颗粒含量对极细砂渗透系数的影响体现在孔隙和整体性的改变上,当细颗粒含量较小时,粗颗粒骨架间孔隙明显,细颗粒具有一定的自由度,会在渗透作用下发生运移或流失,随着细颗粒含量的逐渐增大,粗颗粒骨架之间的孔隙逐渐得到填充,细颗粒的自由度逐渐被限制,在渗流作用下整体结构保持较完整。通过扫描电镜分析可以揭示细颗粒含量对极细砂内部结构和渗透系数的细观影响机制。

参考文献:

[1] 李广信,周晓杰. 土的渗透破坏及其工程问题[J]. 工程勘察,2004(5):10-13. (LI Guangxin,ZHOU Xiaojie. Soil seepage failure and its engineering problems [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2004(5):10-13. (in Chinese))

[2] 郑金海,丁星宇,管大为,等. 循环荷载作用下海上风机单桩基础周围砂土沉降与对流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):552-561. (ZHENG Jinhai, DING Xingyu, GUAN Dawei, et al. Characteristics of soil subsidence and convective motion around offshore windfarm monopile foundations subjected to long-term cyclic loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):552-561. (in Chinese))

[3] 孔令伟,李新明,田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学,2011,32(增刊 2): 21-26. (KONG Lingwei, LI Xinming, TIAN Hunan. Effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters [J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(Sup2):21-26. (in Chinese))

[4] 齐俊修,赵晓菊,张广禹,等. 粉细砂渗透、渗透变形参数统计分析研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(增刊 2):419-424. (QI Junxiu, ZHAO Xiaojie, ZHANG Guangyu, et al. Statistical analysis and study on silty-fine sand permeability and permeability deformation parameter [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(Sup2):419-424. (in Chinese))

[5] 石宇涵. 陕西北部粉细砂湿陷性及渗透性试验研究[D]. 西安:西安工业大学,2016.

[6] 史志敏. 细粒土含量对砂土渗透性的影响[J]. 四川水泥,2018(5):293-294. (SHI Zhimin. Influence of fine-grained soil content on sandy soil permeability [J]. Sichuan Cement,2018(5):293-294. (in Chinese))

[7] 张翔. 考虑渗流过程中细小颗粒流失诱发地表沉降分析[D]. 福州:福州大学,2018.

[8] UENG T S, WANG Z F, CHU M C, et al. Laboratory tests for permeability of sand during liquefaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 100: 249-256.

[9] XU S, BIAN M, LI C, et al. Effects of calcium concentration and differential settlement on permeability characteristics of bentonite-sand mixtures [J]. Applied Clay Science,2018,153:16-22.

[10] 魏建宇. 港口工程海岸泥沙特性探究与现状分析[J]. 中国水运, 2019, 19(11): 166-167. (WEI Jianyu. Research on characteristics and status quo of coastal sediment in port engineering[J]. China Water Transport, 2019,19(11):166-167. (in Chinese))

[11] 王瑞东,高永,党晓宏,等. 希拉穆仁天然草地不同群落土壤分形特征及其影响因素[J]. 水土保持研究,2020, 27(3): 51-56. (WANG Ruidong, GAO Yong, DANG Xiaohong, et al. Characteristics of soil fractals and the influencing factors of different plant communities in the Xilamuren grassland [J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(3):51-56. (in Chinese))

[12] 张继生,钱方舒,童林龙,等. 细砾质斜坡海床上波浪的传播特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(2):150-157. (ZHANG Jisheng, QIAN Fangshu, TONG Linlong, et al. Experimental study on wave propagation over fine gravel slope seabed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):150-157. (in Chinese))

[13] 洪畅,韩旭娇,戴佳栋,等. 毛乌素沙地布寨淖尔下风向沙化湖滨地表沉积物理化特性[J]. 中国沙漠,2020,40(2):86-93. (HONG Chang, HAN Xujiao, DAI Jiadong, et al. The physicochemical characteristics of the surface sediments on dry lake bed in Buzhai-nur Lake, Mu Us Sandy Land, China[J]. Journal of Desert Research,2020, 40(2):86-93. (in Chinese))

[14] 胡明鉴,崔翔,王新志,等. 细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(8):2925-2930. (HU Mingjian, CUI Xiang, WANG Xinshi, et al. Experimental study of the effect of fine particles on permeability of the calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(8):2925-2930. (in Chinese))

[15] 张宜健. 不同粒径级砂性土渗透特性试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.

[16] 任玉宾. 南海钙质砂渗透特性试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.

(收稿日期:2021-06-25 编辑:熊水斌)