

添加膨润土对土壤渗透性及微观结构影响的研究

薛万来^{1,2}, 李法虎^{2*}, 刘晔³, 李彬瑜⁴, 黄炳彬¹

(1.北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2.中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 3.河北工程大学, 河北 邯郸 056000; 4.中国电建集团 北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要:【目的】研究膨润土掺量对砂土渗透性的影响, 为永定河构建生态水面提供理论依据。【方法】通过室内土柱试验, 设置了膨润土添加比例分别为 3%、6%、9%、12% 和 15% 的 5 个不同水平, 系统探究不同膨润土添加量对土壤渗透性及微观结构的影响。【结果】当膨润土掺量从 6% 增加到 15% 时, 改良砂土的渗透系数从 10^{-5} cm/s 降低至 10^{-7} cm/s, 表明膨润土掺量对改良砂土渗透性有显著影响; 对不同膨润土掺量的试样进行微观机理分析可知, 随着膨润土掺量的增多, 土样结构逐渐由颗粒结构体转变为团粒体, 从而导致土体的渗透系数减小, 且大孔隙的面积百分比与改良砂土渗透系数对数正相关, 拟合度 R^2 为 0.89; 随着膨润土掺量的增加, 内部孔隙面积分布的定向性有较好的改善, 从而降低渗透系数; 从微观层面二维平面与三维空间所求的孔隙比 e 与渗透系数对数呈线性回归关系, 拟合度 R^2 分别为 0.98 和 0.96, 其结果与宏观规律一致。【结论】添加膨润土可改善土体孔隙面积, 改变土体平均孔径, 显著降低砂土渗透系数。

关键词: 孔隙特征; 砂土; 渗透性; 微观结构; 电镜扫描

中图分类号: TU411

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021125

OSID:



薛万来, 李法虎, 刘晔, 等. 添加膨润土对土壤渗透性及微观结构影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 85-92.

XUE Wanlai, LI Fahu, LIU Ye, et al. Mixing Soil with Bentonite to Amend Its Microstructure and Permeability[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 85-92.

0 引言

【研究意义】渗透性是土的重要工程性质之一^[1]。多数学者在宏观层次研究土的渗透性, 而宏观规律性还需归因于微观层次的机理分析。土的微观结构是结构单元体和孔隙之间接触和联结关系的总称^[2], 因而土的渗透性很大程度上受到其微观系统结构的影响。

【研究进展】近年来, 基于扫描电镜与图形分析软件对土体微观结构进行分析是当前岩土工程研究中最有效、最直接的方法^[3]。目前, 叶为民等^[4]对上海软土的研究表明, 渗透特征各向异性取决于微观孔隙的各向异性; 牛文杰等^[5]通过对膨润土的微观孔隙率、平均颗粒直径等进行定量分析, 提出了考虑微观结构效应的非饱和渗透系数计算公式; 高发亮等^[6]通过电镜扫描图片的定性分析, 从微观角度解释了不同土质渗透性差异的本质; 杨博等^[11]认为, 改性黄土渗透系数与微观有效孔隙显著相关; 隋军等^[7]从微观的定性及定量上分析得出, 大、中孔隙的数量与黄土渗透系数有密切关系; 姜彤等^[8]应用蒸汽平衡法和扫描电子显微镜对膨润土持水特性和微观进行了定性

分析; Takai 等^[9]采用柔性壁渗透仪, 研究分析了不同配比制成的膨润土-水泥-土试样渗透试验, 发现固化时间显著影响试样渗透系数; Sakai 等^[10]分析了孔隙大小、数量和分布特征等材料结构特征与渗透性关系。【切入点】上述研究多数从渗透系数与孔隙结构相关关系揭示渗透系数变化特征, 并通过微观孔隙结构定性方面入手揭示渗透系数变化的原因, 但从微观结构定量方面研究较少, 尤其关于孔隙定向排列特征以及孔隙结构参数对渗透系数变化影响的研究有待进一步深入。

【拟解决的关键问题】基于此, 本试验以永定河断流区表层砂土为研究对象, 采用膨润土对砂土进行改良处理使其达到预期的渗透性, 并基于电镜扫描观测和渗透试验, 研究改良砂土渗透性及其微观结构变化关系, 旨在为永定河(北京段)实现“控制渗漏、构建生态水面”的目标要求提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

试验用砂土取自永定河下游立堡村, 砂土物理指标经室内试验测定后见表 1, 改良砂土所用膨润土性能指标见表 2。试验装置由内径为 10 cm、高 50 cm 的土柱和内径为 5 cm 的马氏瓶供水系统组成。

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX07101005-03)

作者简介: 薛万来(1989-), 男, 江苏淮安人。高级工程师, 博士, 主要从事水土环境工程研究。E-mail: xuewanlai@126.com

通信作者: 李法虎(1963-), 男, 河南新乡人。教授, 博士, 主要从事水土工程研究。E-mail: lifahu@cau.edu.cn

表 1 砂土物理指标

Table 1 Physical properties of the sandy soil

粒径/mm				土粒比重 G_s	堆积密度/ (g cm^{-3})	紧密密度/ (g cm^{-3})	渗透系数/ (cm s^{-1})
0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005				
6.5%	62.6%	28.6%	2.3%	2.668	1.35	1.55	8.67×10^{-5}

表 2 膨润土性能指标

Table 2 Physical properties of the Bentonite

项目	吸蓝量/($\text{g}/100 \text{ g}^{-1}$)	胶质价/($\text{mL } 15 \text{ g}^{-1}$)	膨胀倍数	含水率/%
质量标准	$\geq 18-30$	≥ 500	≥ 15	< 10

1.2 试验方案与方法

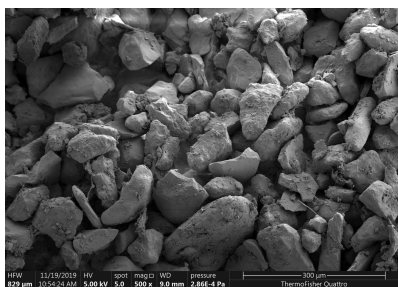
本次试验设置土层高度为 20 cm，膨润土的掺量设置为 0%、3%、6%、9%、12% 和 15%，膨润土和砂土混合后干密度设置为 1.35、1.40、1.45、1.50 g/cm^3 和 1.55 g/cm^3 ，每组做 3 份平行对照。在恒定水头 40 cm 下记录马氏瓶水面刻度。入渗相对稳定时结束试验，然后进行电镜扫描试验。

微观扫描试验采用环境扫描电子显微镜 (SEM) 采集土体的微观结构图像。将土样置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内 8 h 烘至恒质量后，切出 1 个 20 mm \times 10 mm \times 10 mm 的长方体，再将试样掰断，露出新鲜表面以备观测。采用 Image-pro Plus 图像处理软件对土体微观结构的 SEM 图像进行分析。

2 结果与分析

2.1 渗透试验结果

不同膨润土掺量的渗透系数见表 3。由于砂土结构松散且黏聚力较小，膨润土掺量为 0% 时，水流立即渗入试样底部，渗透系数均值为 $8.13 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ；掺量小于 6% 时，改性砂土的渗透系数从 10^{-5} cm/s 降低至 10^{-6} cm/s ，变化幅度较小。掺量从 6% 增加到 15% 时，改良砂土的渗透系数从 10^{-5} cm/s 降低至 10^{-7} cm/s ，渗透系数变化较大。结合 SEM 图像 (图 1) 可以看出，随着膨润土掺量的增多，越来越多的细颗粒填充到砂土颗粒的孔隙中，并不断地吸附到砂土的骨架颗粒上，从而使砂土渗透系数降低。当膨润土掺量小于 6% 时，渗透系数保持在 ($5.29 \times 10^{-5} \sim 8.67 \times 10^{-5}$) cm/s 之间，改良砂土的渗透性差异较小；当膨润土掺量大于 6% 时，渗透系数几乎均在同一量级内变化。因此，



SEM 图像

膨润土的掺入要比增加干密度对砂土渗透系数的影响大，并且随着膨润土的掺入可以明显降低砂土的渗透系数。

表 3 改良砂土的渗透系数

Table 3 The permeability coefficient of modified sandy soil cm/s

密度 $\rho/$ (g cm^{-3})	膨润土掺量 $\lambda/\%$					
	0	3	6	9	12	15
1.35	8.67×10^{-5}	6.96×10^{-5}	3.47×10^{-5}	6.33×10^{-6}	4.01×10^{-6}	6.47×10^{-7}
1.40	8.59×10^{-5}	7.21×10^{-5}	1.52×10^{-5}	6.48×10^{-6}	4.97×10^{-6}	5.93×10^{-7}
1.45	8.68×10^{-5}	6.83×10^{-5}	9.63×10^{-6}	5.12×10^{-6}	3.64×10^{-6}	5.43×10^{-7}
1.50	7.43×10^{-5}	6.51×10^{-5}	9.45×10^{-6}	4.50×10^{-6}	2.77×10^{-6}	4.63×10^{-7}
1.55	7.32×10^{-5}	5.29×10^{-5}	7.32×10^{-6}	3.88×10^{-6}	1.58×10^{-6}	1.77×10^{-7}

2.2 试样微观结构特征

改良砂土的渗透系数受膨润土掺量影响较大，故下文只对不同膨润土掺量的试样进行微观机理分析。对膨润土掺量为 0% 的砂土试样图片进行观察分析可知 (图 1 (a))，试样的骨架颗粒形态为粒状，孔隙以架空孔隙为主，孔隙粗大且排列疏松，有较好的连通性；土壤颗粒单元体接触面积较小，多为点接触。图 1 (b)、图 1 (c)、图 1 (d) 分别是膨润土掺量为 3%、9%、15% 的改性砂土扫描电镜的典型图片。图 1 (b) 中，土体细孔隙慢慢被填充，大孔隙数量减少，粗骨架慢慢絮凝，逐渐变成凝絮体；图 1 (c) 中，孔隙变化较大，土体几乎粘连，连接较紧密，开始呈“面-面”结构，表面不平整且多为凝絮体，结构面互相牵制；图 1 (d) 中，孔隙几乎不可见，土体黏结较好，结构面较稳定且趋向整体型，表面较平滑，出现小颗粒体，土体物理力学性能逐渐稳定。由上述图像可以看出，同纯砂土试样相比，随着膨润土掺量的增多，孔隙的数量与大小都呈减小趋势，胶结物将孔隙填充，砂土中的架空孔隙随之减少，使得孔隙类型由架空孔隙逐渐过渡到镶嵌孔隙，骨架土颗粒的接触方式由点接触转变为面接触，从而导致土体的渗透系数减小^[11]。



二值化图像

(a) 掺量 0%，密度 1.5 g/cm^3

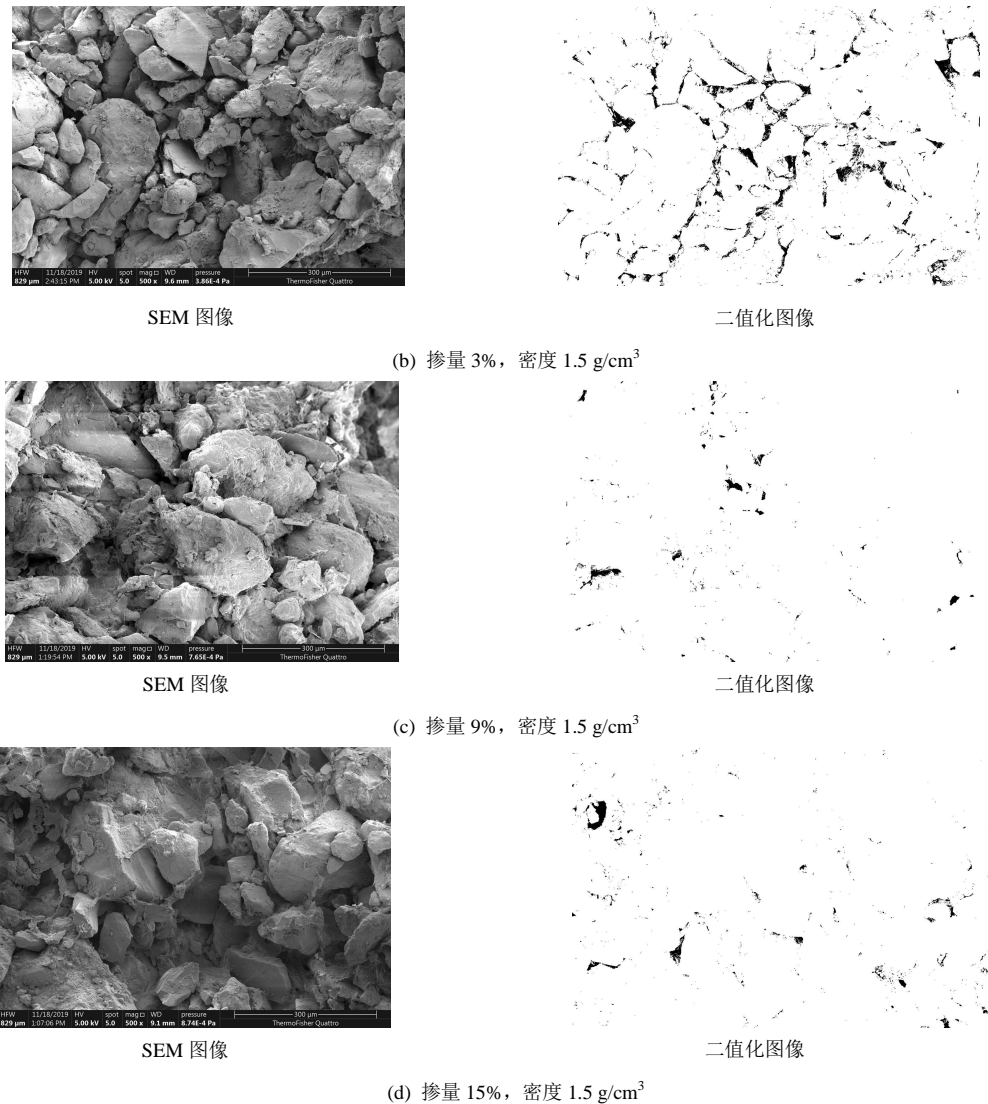


图 1 膨润土改良砂土扫描电镜图片 (×500)

Fig.1 SEM image of bentonite-modified sandy soil

2.3 试样微观结构定量分析

本文依据参考文献[12]提出的孔隙划分标准(见表4)，应用 Image-pro Plus 软件，并选取孔隙平均孔径 D 、孔隙面积 S 、孔隙面积比 A 作为孔隙形态特征参数，选取定向角 (R)，对于密度为 1.5 g/cm^3 下 6 种膨润土掺量试样放大 500 倍微观扫描图像进行定量分析。

表 4 孔隙分类

孔隙类别	直径/ μm	孔隙类别	直径/ μm
微孔隙	(0,2)	中孔隙	[8,32)
小孔隙	[2,8)	大孔隙	[32,+\infty)

图 2 为膨润土掺量与孔隙面积比和平均孔径的关系。由图 2 可知，随着膨润土掺量的增加，改良砂土的微观孔隙形态特征发生了变化，平均孔径从 $10.8 \mu\text{m}$ 降到了 $4.01 \mu\text{m}$ ，孔隙面积比从 37.78% 降到了 29.68%；当掺量小于 6% 时，不同处理平均孔径与孔隙面积比变幅较大，平均孔径下降 49.26%，孔隙面积下降 13.85%，这与上文所述掺量较少时膨润土颗

粒在渗流作用下容易被冲走的结果一致。膨润土掺量改变砂土的渗透特性主要是通过改变土体孔隙面积和土体平均孔径，说明团粒内孔隙直径随着膨润土含量的增多而逐渐变小，这也验证了 2.2 节中不同处理下砂土微观孔隙结构的变化现象。图 3 为孔隙面积百分比与膨润土掺量关系图。由图 3 可知，随着膨润土掺量的增大，微观大孔隙面积百分比从 31.27% 降至 13.76%，而中小孔隙面积百分比增加，但微孔隙面积百分比保持在 0.2% 左右。从微观角度分析可得，随着膨润土掺量增加，膨润土细颗粒优先填充砂土颗粒中的大孔隙，将其分割成直径较小的中小微孔隙，导致中小孔隙面积百分比增加。由于微孔隙所占面积整体较小，故在图 3 中微孔隙面积比未有明显增加。图 4 为大孔隙面积百分比与渗透系数对数的关系图。由图可知，大孔隙的面积百分比与改良砂土渗透系数对数之间有很好的线性关系。由以上分析可知，膨润土添加填充了砂土颗粒间的大中孔隙。随着膨润土掺量的增加，砂土中的大孔隙数量不断减小，由 31.27%

降至 13.76%；另一方面，膨润土附着在砂土颗粒表面，导致砂土颗粒表面和边缘粗糙不清，增大了土体的比表面积，将砂土中的多数大孔隙转化为比表面积更大的中小孔隙^[11]。

面积比增加。总体来看，随着膨润土掺量的增加，可以很好地改善改性砂土内部孔隙面积分布的定向性，从而降低改良砂土的渗透系数。

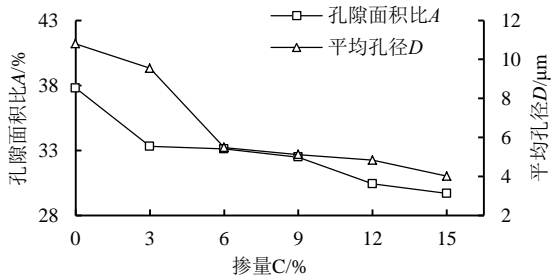


图 2 膨润土掺量与孔隙面积比和平均孔径关系

Fig.2 Ratio of pore area and pore diameter to bentonite addition

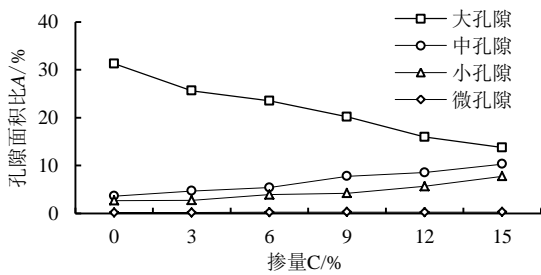


图 3 孔隙面积百分比与膨润土掺量关系

Fig.3 Ratio of pore area vs bentonite addition

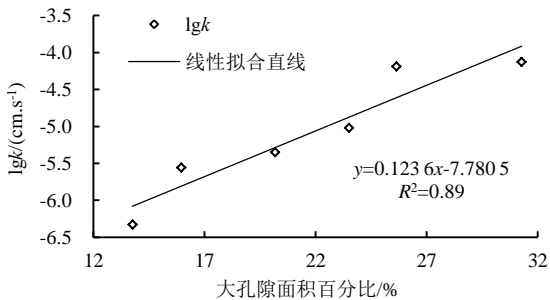


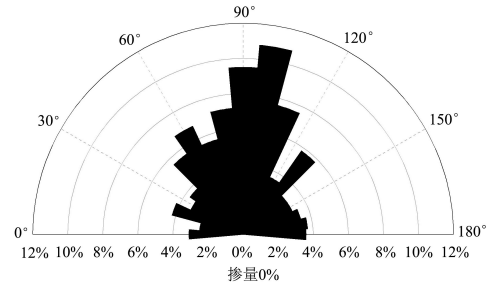
图 4 大孔隙面积百分比与渗透系数对数关系

Fig.4 Ratio of macropore area vs Logarithm of permeability coefficient

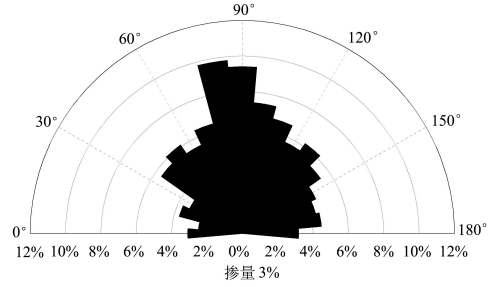
2.4 孔隙定向分布特征

孔隙在特定方向上的分布，可以用方向角 (R) 表示，单元体在 $0\sim 360^\circ$ 内镜像对称^[12]。故可将 $0\sim 180^\circ$ 划分成 18 等分，由方向角统计计算出 $0\sim 180^\circ$ 内每个分区中的孔隙累计面积，以面积百分比为半径，画出孔隙分布玫瑰图 (图 5)。

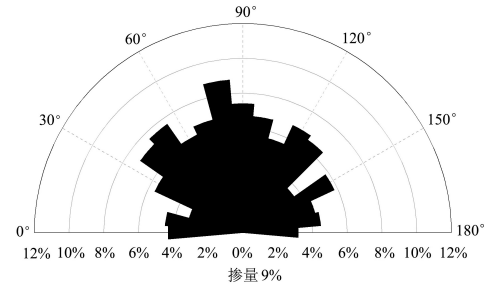
结果表明，原状土与膨润土掺量为 3% 改良砂土的孔隙面积分布表现出一定的定向性，主要在 $80\sim 100^\circ$ 之间，这可能与干密度有关。本试验采用落锤法控制干密度，垂向作用力致使孔隙发生横向排列，使得孔隙长竖轴之间的夹角趋于垂直，因此孔隙面积分布多集中在 90° 附近。随着膨润土掺量的增加，孔隙面积分布的这种定向性有所缓解， $80\sim 100^\circ$ 内孔隙面积所占百分比减小， $20\sim 40^\circ$ 和 150° 附近的孔隙



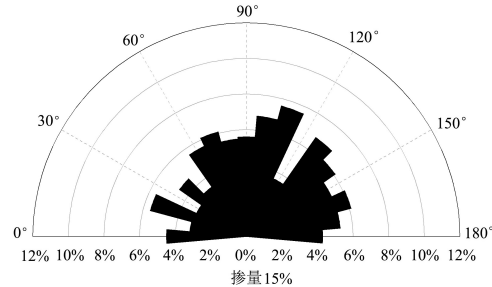
(a) 掺量 0%，孔隙定向分布玫瑰图



(b) 掺量 3%，孔隙定向分布玫瑰图



(c) 掺量 9%，孔隙定向分布玫瑰图



(d) 掺量 15%，孔隙定向分布玫瑰图

图 5 孔隙分布玫瑰图

Fig.5 Rose diagrams of pore distribution

2.5 孔隙结构参数与渗透系数的关系

能产生渗流的孔隙为有效孔隙，由有效孔隙计算得到的孔隙比为有效孔隙比。杨博等^[1]研究渗透系数与微观孔隙结构参数关系时，将微观大、中孔隙面积之和与总孔隙面积之比定义为微观层面的孔隙率 n_f ，从而将传统的孔隙比修正为微观层面的有效孔隙比 e_f 。但依据雷祥义^[12]提出的孔隙划分标准 (见表 4)，其中“微观大、中孔隙”的直径均大于 $8\ \mu\text{m}$ 。本文依据杨博等人的研究思路，将本研究试验结果进行拟合 (见表 5)，得到微观层面有效孔隙比 e_f 与渗透系

数对数 $\lg k$ 的关系（见图 6）。由图 6 可知，拟合度 R^2 为 0.79，表明 $\lg k$ 与 e_f 间的线性关系不显著。其原因可能是杨博等忽略了微小孔隙对渗流的影响作用。这表明，对于改良砂土，微小孔隙对渗流的影响不可忽略。

表 5 不同方法的孔隙比

Table 5 Void ratio computation by different methods

由参考文献 算孔隙率 $n_f/\%$	由参考文献 算孔隙比 e_f	微观平面 有效孔隙率 $\eta_2/\%$	微观平面 有效孔隙比 e_2	三维 孔隙率 $\eta_3/\%$	三维 孔隙比 e_3
34.90	0.54	35.20	0.54	36.73	0.58
30.34	0.44	34.34	0.52	35.69	0.55
28.90	0.41	30.72	0.44	32.85	0.49
27.96	0.39	29.49	0.42	31.49	0.46
24.49	0.32	28.96	0.41	29.16	0.41
24.07	0.32	26.68	0.36	27.57	0.38

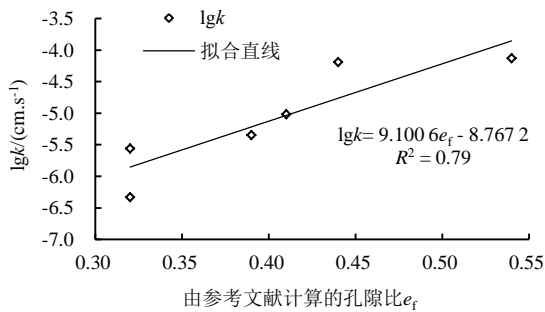


图 6 渗透系数对数与孔隙比的关系

Fig.6 Logarithm of permeability coefficient vs void ratio

党发宁等^[14]认为弱结合水占据的孔隙为无效孔隙。崔德山等^[15]研究表明，黏土的弱结合水膜厚度为 $0.12 \mu\text{m}$ 左右。而周健等^[16]建议，大于 2 倍弱结合水膜厚度的孔隙才为有效孔隙。因此，本研究以直径大于 $0.24 \mu\text{m}$ 的孔隙为微观有效孔隙。为了对应宏观孔隙参数，将孔隙理想化为圆形，定义微观孔隙参数如下：

微观平面有效孔隙率 η_2 ：

$$\eta_2 = A_{\text{效}} / A_{\text{视域}}, \quad (1)$$

式中： $A_{\text{效}}$ 为微观有效孔隙面积； $A_{\text{视域}}$ 为视域总面积。

微观平面有效孔隙比 e_2 ：

$$e_2 = \eta_2 / (1 - \eta_2), \quad (2)$$

式中： η_2 为微观平面孔隙率。

Lambe 等^[17]研究结果显示，宏观孔隙比与渗透系数的对数值之间有很好的线性关系，类比可得到渗透系数 k 和微观孔隙比 e_2 之间的关系式：

$$\lg k = \alpha e_2 + \beta, \quad (3)$$

式中： α 和 β 均为常数。

基于上述计算公式与方法，可得干密度为 1.5 g/cm^3 时不同膨润土掺量改良砂土渗透系数的对数与平面孔隙比 e_2 之间的拟合关系如图 7 所示。与图 6 相比，图 7 数据规律性较好，拟合度 R^2 为 0.98，表明精确定义后的微观平面孔隙比与渗透系数对数之

间有更好的线性关系。

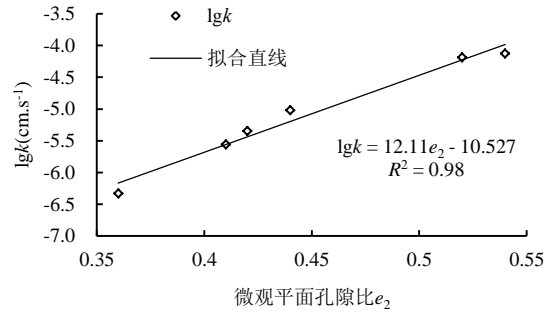


图 7 渗透系数对数与平面孔隙比的关系

Fig.7 Logarithm of permeability coefficient

vs void ratio after definition

前文所述对于土体微观孔隙结构参数的研究均停留在二维定量分析阶段，但通过电镜扫描所得到的二维 SEM 图像中同样包含有关土体结构、颗粒大小、孔隙大小等大量三维信息。王宝军等^[18]利用地理信息系统（GIS）中的数字高程模型实现了颗粒表面的三维重建，并假设每个像素都以各自面积为底面积、各自的灰度值为高，类似于用积分方式计算颗粒与孔隙体积，从而在 ArcGIS 中利用三维分析模块的 3D-analysis 来计算其面积和体积。

本文将 GIS 系统给出的孔隙体积 $V_{\text{孔}3}$ 和总体积 $V_{\text{总}3}$ 的比值定义为微观三维孔隙比 e_3 ，即：

$$e_3 = V_{\text{孔}3} / V_{\text{总}3}, \quad (4)$$

式中： $V_{\text{孔}3}$ 为 GIS 系统计算出的孔隙体积； $V_{\text{总}3}$ 为 GIS 系统计算出的总体积。

基于上述计算公式与方法，可得干密度为 1.5 g/cm^3 时不同膨润土掺量改良砂土渗透系数对数与微观三维孔隙比 e_3 之间的拟合关系如图 8 所示，拟合度 R^2 为 0.96，表明由 GIS 处理所得到的微观三维孔隙比与渗透系数对数之间也有较好的线性关系。

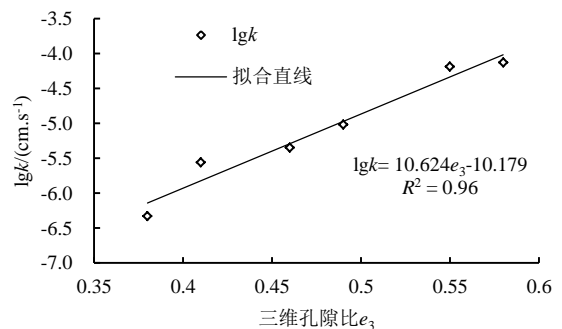


图 8 三维孔隙比与渗透系数对数的关系

Fig.8 Logarithm of permeability coefficient

vs three dimensional void ratio

3 讨论

通过室内试验，分析了在 3%、6%、9%、12% 和 15% 膨润土添加比例条件下对土壤渗透特性变化

的影响。试验结果表明,当膨润土的掺量从 6% 增加到 15% 时,改良砂土的渗透系数从 10^{-5} cm/s 降低至 10^{-7} cm/s,渗透系数变化较大,膨润土掺量对改良砂土渗透系数有显著影响,这与前人^[20-22]研究结论一致,即随着膨润土掺量的增加,加入膨润土后混合土的渗透系数明显下降。不同处理试验的微观孔隙结构特征表明,膨润土添加改变了土体的孔隙尺度分布和结构特征。膨润土微小颗粒通过填充和吸水膨胀致使砂土大孔隙急剧减少,同时膨润土微细颗粒吸水膨胀的“挤压”和细颗粒的“阻塞”使砂土孔隙连通性降低。本研究砂土中的大孔隙数量由 31.27% 降至 13.76%,同时平均孔径由 10.8 μm 降到了 4.01 μm 。土体孔隙尺度和孔隙结构特征对土体的渗透性有着显著的影响。掺入少量膨润土致使砂土大孔隙明显减少而土体渗透性大为降低,这与前人^[23-24]的试验结果一致。

微观结构定量分析表明,随着膨润土掺量的增大,改良砂土中的大孔隙面积逐渐减小,中小孔隙占比升高。微观大孔隙面积百分比从 31.27% 降至 13.76%,微观中孔隙面积百分比由 2.69% 增加至 10.31%,本研究结果与部分学者^[11, 25-26]研究结论较为一致。本文在前人研究的基础上重新定义了微观孔隙参数,并比较了精确定义前后的微观平面孔隙比与渗透系数对数之间线性关系的拟合度,结果表明后者的拟合度更高。因此,后续研究中可通过分析微观三维孔隙比与渗透系数之关系,更精准揭示改性材料添加对土壤渗透特性影响的原因。

4 结论

1) 膨润土掺量的增加能显著改变砂土的渗透性。掺入膨润土后,在掺量小于 6% 时,改性砂土的渗透系数从 10^{-5} cm/s 降低至 10^{-6} cm/s,变化幅度较小。当掺量从 6% 增加到 15% 时,渗透系数从 10^{-5} cm/s 降低至 10^{-7} cm/s,渗透系数变化较大。

2) 加入膨润土使得砂土孔隙类型由架空孔隙逐渐过渡到镶嵌孔隙,且能够较好地改善内部孔隙面积分布的定向性,将大孔隙填充分割成较小的中小孔隙。随着膨润土掺量的增大,微观大孔隙面积百分比从 31.27% 降至 13.76%,但微孔隙面积百分比保持在 0.2% 左右。大孔隙的面积百分比与渗透系数对数之间呈线性关系。膨润土添加可改善改性砂土内部孔隙面积分布的定向性,降低改良砂土的渗透系数。

3) 根据微观层面二维平面与三维空间所求得的孔隙比 e 与渗透系数对数之间存在线性回归关系。相比传统孔隙划分定义(微观大、中孔隙的直径均大于 8 μm)而言,精确定义后(直径大于 0.24 μm)的微

观平面孔隙比与渗透系数对数之间有更好的线性关系,微观三维孔隙比与渗透系数对数之间也有较好的线性关系。改性材料添加对土壤渗透性的后续研究可从微观层面深入开展。

参考文献:

- [1] 杨博,张虎元,赵天宇,等. 改性黄土渗透性与孔隙结构的依存关系[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 96-101.
YANG Bo, ZHANG Huyuan, ZHAO Tianyu, et al. Responsibility of permeability of modified loess soil on microstructure[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(6): 96-101.
- [2] 李顺群,柴寿喜,王英红,等. 阈值选取对黏土微结构参数的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(4): 354-360.
LI Shunqun, CHAI Shouxi, WANG Yinghong, et al. Influence of grey threshold on microstructure for SEM photograph[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(4): 354-360.
- [3] 唐朝生,施斌,王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560-565.
TANG Chaosheng, SHI Bin, WANG Baojun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565.
- [4] 叶为民,杨林德,黄雨,等. 上海软土微观空隙各向异性特征及其成因分析[C]//第七届全国工程地质大会论文集, 2004: 96-99
YE Weimin, YANG Linde, HUANG Yu, et al. Microstructure and anisotropy of seepage of Shanghai soft soil[C]//Journal of Engineering Geology, 2004: 96-99.
- [5] 牛文杰,叶为民,陈宝,等. 考虑微观结构的非饱和渗透系数计算公式[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(6): 34-39.
NIU Wenjie, YE Weimin, CHEN Bao, et al. The equations of unsaturated permeability considering the microstructure[J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(6): 34-39.
- [6] 高发亮,商庆森,马国梁. 粉土、粘土压实与渗透微观机理的研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 292-295.
GAO Faliang, SHANG Qingsen, MA Guoliang. Research on compaction and infiltration microscopic mechanism of silt and clay[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2010, 30(3): 292-295.
- [7] 隋军,高振宇,张颖,等. 石灰改良黄土渗透特性试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 197-202, 209.
SUI Jun, GAO Zhenyu, ZHANG Ying, et al. Experimental study on permeability characteristics of lime-treated loess[J]. Yangtze River, 2020, 51(5): 197-202, 209.
- [8] 姜彤,王兴翠,张俊然. 膨润土持水特性试验研究及其 SEM 微观定性分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 90-96.
JIANG Tong, WANG Xingcui, ZHANG Junran. Experimental study on water retention characteristics of bentonite and its SEM microscopic qualitative analysis[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 90-96.
- [9] TAKAI A, YAMAGUCHI K, INUI T, et al. Hydraulic conductivity of soil-bentonite cutoff walls constructed at the ground containing cement stabilized soil[M]. Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 2. Singapore: Springer Singapore, 2018: 558-566.
- [10] SAKAI Y Y. Relationship between water permeability and pore structure of cementitious materials[J]. Magazine of Concrete Research, 2020, 72(23): 1 235-1 242.
- [11] 闫小庆,房营光,张平. 膨润土对土体微观孔隙结构特征影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1 302-1 307.

- YAN Xiaoqing, FANG Yingguang, ZHANG Ping. Experiment study on the effects of bentonite on the micropore structure characteristics of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1 302-1 307.
- [12] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学 (B 辑 化学 生物学 农学 医学 地学), 1987, 17(12): 1 309-1 318.
- LEI Xiangyi. Pore types and collapsibility of Chinese loess[J]. Science in China, SerB, 1987, 17(12): 1 309-1 318.
- [13] 施斌, 姜洪涛. 粘性土的微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864-870.
- SHI Bin, JIANG Hongtao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 864-870.
- [14] 党发宁, 刘海伟, 王学武, 等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1 909-1 917.
- DANG Faning, LIU Haiwei, WANG Xuewu, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1 909-1 917.
- [15] 崔德山, 项伟, 曹李靖, 等. ISS 减小红色黏土结合水膜的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 944-949.
- CUI Deshan, XIANG Wei, CAO Lijing, et al. Experimental study on reducing thickness of adsorbed water layer for red clay particles treated by ionic soil stabilizer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 944-949.
- [16] 周建, 徐杰, 余良贵, 等. 高岭-蒙脱混合黏土渗透各向异性的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1 005-1 013.
- ZHOU Jian, XU Jie, YU Lianggui, et al. Microscopic mechanism regarding permeability anisotropy of Kaolin-montmorillonite mixed clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1 005-1 013.
- [17] LAMBE T W, WHITMAN S E. Soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1969.
- [18] 王宝军, 施斌, 蔡奕, 等. 基于 GIS 的黏性土 SEM 图像三维可视化与孔隙度计算[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 251-255.
- WANG Baojun, SHI Bin, CAI Yi, et al. 3D visualization and porosity computation of clay soil SEM image by GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 251-255.
- [19] 王宝军, 施斌, 刘志彬, 等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 244-247.
- WANG Baojun, SHI Bin, LIU Zhibin, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 244-247.
- [20] 陈永贵, 雷宏楠, 贺勇, 等. 膨润土-红黏土混合土对 NaCl 溶液的渗透试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 910-915.
- CHEN Yonggui, LEI Hongnan, HE Yong, et al. Experimental study of permeability of bentonite-laterite mixtures for salt solutions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(4): 910-915.
- [21] 邓寅生, 黄研, 李武斐, 等. 膨润土对垃圾填埋场天然土壤衬垫的改性研究[J]. 环境卫生工程, 2011, 19(1): 19-21.
- DENG Yinsheng, HUANG Yan, LI Wufei, et al. Modified study on liner of natural soil in waste landfill sites using bentonite[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2011, 19(1): 19-21.
- [22] 杜圣军. 卫生垃圾填埋场中膨-砂复合土渗透特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2008.
- DU Shengjun. Research on bentonite-soil mixture's permeability characteristics in sanitary landfill[D]. Shanghai: Donghua University, 2008.
- [23] 崔自治, 张群, 彭博, 等. 膨润土与黏性土复合改善砂土抗渗性研究[J]. 节水灌溉, 2010(12): 60-63, 66.
- CUI Zizhi, ZHANG Qun, PENG Bo, et al. Research on improving sand impermeability by using bentonite-cohesive soil composite[J]. Water Saving Irrigation, 2010(12): 60-63, 66.
- [24] 郭李娜, 张永波, 段清, 等. 改性材料固化黄土的微观机理研究[J]. 节水灌溉, 2021(7): 1-6, 13.
- GUO Li'na, ZHANG Yongbo, DUAN Qing, et al. Study on the micro mechanism of loess solidified by modified materials[J]. Water Saving Irrigation, 2021(7): 1-6, 13.
- [25] 苏立君, 张宜健, 王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1 289-1 294.
- SU Lijun, ZHANG Yijian, WANG Tiexing. Investigation on permeability of sands with different particle sizes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1 289-1 294.
- [26] 刘通. 煤矸石粉改良膨胀土渗透性与孔隙特征的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- LIU Tong. Research on permeability and porosity characteristics of expansive soil with coal gangue powder[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.

Mixing Soil with Bentonite to Amend Its Microstructure and Permeability

XUE Wanlai^{1,2}, LI Fahu^{2*}, LIU Ye³, LI Binyu⁴, HUANG Bingbin¹

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Hebei University of Engineering, Handan 056000, China; 4. Powerchina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: 【Background and objective】 Soil permeability is an important engineering parameter modulated by its microscopic structure. The southern section of Yongding River has been drying out of water for a long time with the riverbed deserted. To improve hydro-ecological properties of the riverbed, this paper studied the feasibility of amending the riverbed soil with bentonite. 【Method】 Sandy soil samples taken from the riverbed were amended with bentonite at ratios ranging from 3% to 15%. Following an incubation, each sample was scanned using the scanning electron microscope (SEM). Penetration test was conducted in a laboratory to measure the permeability, from which we analyzed the relationship between soil permeability and soil microstructure. 【Result】 Amending the soil with bentonite at ratio of 6% to 15% reduced the soil permeability from 10^{-5} cm/s to 10^{-7} cm/s. Microstructure analysis of the samples amended with bentonite at different ratios showed that with the increase in bentonite content, the microstructure changed gradually from granular structure to agglomerate structure, resulting in a decrease in

permeability. The aerial percentage of macropores was positively correlated with permeability. Increasing bentonite content improved the orientation of the pore area distribution, with the percentage of pore area within 80° to 100° decreasing and the ratio of pore area around 20° to 40° and 150° increasing. These combined to reduce the soil permeability. Two- and three-dimensional analysis of the microscopic structure revealed that the pore ratio and the logarithm of the permeability were linearly correlated, with R^2 being 0.98 for 2D and 0.96 for 3D, respectively.

【Conclusion】 Adding bentonite to the sandy soils taken from the riverbed of Yongding river showed that the addition improved the pore area, changing the average pore diameter as a result. These combined to reduce soil permeability significantly.

Key words: pore characteristics; sandy soil; penetration; microstructure; SEM

责任编辑：赵宇龙

(上接第 60 页)

The Effects of Soil Salinity on Photosystem II of Rice Seedlings

ZHANG Yunhe, GAO Dapeng, WANG Xiaolei, SHAO Xiwen,
GUO Liying, HUANG Jinrui, GENG Yanqiu*
(Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: **【Objective】** Photosystem II (water-plastoquinone oxidoreductase) is a protein complex in light-dependent reactions of oxygenic photosynthesis. The purpose of this paper is to study the effect of salt stress on photosystem II of rice seedlings. **【Method】** We used the varieties of Changbai 9 and Baijing 1 as the model plants. The salt was a mixture of salts at ratios of $\text{NaCl} : \text{Na}_2\text{SO}_4 : \text{Na}_2\text{CO}_3 : \text{NaHCO}_3 = 1 : 9 : 1 : 9$. Solution of this salt mixture at concentrations from 0 to 120 mmol/L was added to the soil with the irrigation water. In each treatment, we measured and calculated the rapid chlorophyll fluorescence induction kinetic curve using the JIP-test, from which we calculated the change in photosystem II in the leaves of the rice seedlings. **【Result】** When salt concentration was in 0~80 mmol/L, the chlorophyll fluorescence kinetic curve of the rice seedlings of both varieties was a typical OJIP curve, and the fluorescence intensity in each treatments differed significantly from the Point J. When salt concentration was increased to 120 mmol/L, the OJIP curve of the two varieties flattened, changing from the Point J to Point P, with the fluorescence intensity at Point I and Point P decreasing remarkably compared to CK (without salinity). There were non-linear relationships between salt concentration and the index PI_{ABS} , (φ_{E_0} , φ_{R_0} , ψ_{E_0}), donor-side index (W_{K}) and the recipient-side index (V_{J}) for both varieties. With the increase in soil salinity, water content, the contents of chlorophyll a and b, maximum photochemical efficiency ($F_{\text{V}}/F_{\text{M}}$), quantum yield and efficiency (φ_{E_0} , φ_{R_0} , ψ_{E_0}), the index PI_{ABS} of both varieties all gradually decreased, while W_{K} , V_{J} , and the heat dissipation ratio (φ_{D_0}) gradually increased. The change in water content, chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of the two varieties gradually increased with the increase in salt concentration. **【Conclusion】** Saline-alkali stress severely damages the donor/acceptor laterality, especially the acceptor lateral performance index V_{J} , hindering electron transmission and reducing the quantum yield and the performance of photosystem II. PSII performance index PI_{ABS} , V_{J} , W_{K} and quantum yield are nonlinearly correlated with the salt concentration.

Key words: rice; salt-alkali mixed stress; optical system II

责任编辑：白芳芳