

# 不同黏粒含量对黄土渗透系数影响的试验研究

王力<sup>1</sup>, 李喜安<sup>1,2</sup>, 何军<sup>1</sup>, 洪勃<sup>1</sup>, 李林翠<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部 岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 开展不同黏粒含量对黄土渗透系数影响的试验研究, 揭示黏粒含量对渗透系数的影响及其微观机理, 为黄土及其渗透性相关的理论与工程实践提供科学依据。[方法] 通过自制负压湿筛装置筛取不同黏粒含量的黄土试样, 利用激光粒度仪对土样的黏粒含量进行跟踪测定, 采用静压法将不同黏粒含量的黄土试样制成天然干密度水平下的不同含水率试样进行饱和渗透试验。[结果] 黏粒含量对黄土渗透性能有较大影响, 在同一含水率条件下, 随黏粒含量的增多, 黄土的渗透性逐渐降低, 渗透系数与黏粒含量呈指数函数负相关关系; 在黏粒含量一定时, 渗透系数随着初始含水率的增加而减小, 呈指数函数负相关关系; SEM 分析结果表明, 随着黏粒含量的增加, 黄土试样微观结构由分散结构变为致密结构, 部分颗粒的接触方式由支架接触变为镶嵌接触, 颗粒连接由葱皮连接或桥接变为嵌埋连接, 相应地孔隙则由支架大孔变为黏粒间微小孔隙, 从而一定程度上降低了黄土的渗透性。[结论] 黄土渗透系数受黏粒含量、含水率的影响规律相似, 可通过微观结构对其影响机理进行解释。

**关键词:** 黄土; 负压湿筛; 黏粒含量; 渗透系数; 微观结构

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2018)02-0095-07

**中图分类号:** TU411.4

**文献参数:** 王力, 李喜安, 何军, 等. 不同黏粒含量对黄土渗透系数影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 95-101. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.016. Wang Li, Li Xian, He Jun, et al. Experimental study on permeability coefficient of loess with different clay content[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 95-101.

## Experimental Study on Permeability Coefficient of Loess with Different Clay Content

WANG Li<sup>1</sup>, LI Xian<sup>1,2</sup>, HE Jun<sup>1</sup>, HONG Bo<sup>1</sup>, LI Lincui<sup>1</sup>

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Land and Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] An experiment focused on the effect of different clay content on the permeability coefficient of loess was carried out, to reveal the influence of clay content on the permeability coefficient and its microscopic mechanism, and then to provide a scientific basis for the permeability of theory and engineering practice of loess. [Methods] Self-made wet sieve device under negative pressure was applied to screen loess samples with different clay content. Laser particle analyzer was carried out to track measurement clay content of the loess soil. Different clay content of the loess samples were made to the natural dry density, but with different moisture content using static pressure method, and then saturated by infiltration experiment. [Results] The clay content of the loess had a great influence on its permeability. For samples with the same moisture content, the permeability of loess reduced gradually as the clay content increased. In addition, permeability coefficient exhibited an exponential and negative relationship with the content of clay as independent variable. The permeability coefficient decreased with the increase of the initial water content for

收稿日期: 2017-09-10

修回日期: 2017-10-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于三维微观结构的黄土湿陷性成因及潜蚀黄土场地湿陷机理研究”(41572264)

第一作者: 王力(1988—), 男(汉族), 陕西省华县人, 博士研究生, 主要研究方向为黄土工程地质及地质灾害防治。E-mail: cadxwangli@163.com。

通讯作者: 李喜安(1968—), 男(汉族), 陕西省丹凤县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土地质灾害方面的教学与科研工作。E-mail: delixa@chd.edu.cn。

those samples with same clay content. With the increase of clay content, the microstructure of loess samples changed from a dispersed structure to a dense structure. The contact of some particles changed from bracket contact to mosaic contact. The particle connections were connected or bridged into embedded connections. The pores changed from stent macroporous to small ones among clay particles, whereby the permeability of the loess was reduced to some extent. [Conclusion] The responses of the permeability coefficient of loess to clay content and moisture content were similar. Its impact mechanism can be explained by the microstructure.

**Keywords:** loess; negative pressure wet screen; clay particle content; permeability coefficient; microstructure

中国是世界上黄土面积分布最广的国家之一,黄土分布面积约有  $6.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。黄土是一种特殊性土,它是干旱和半干旱地区的一种较松散的欠压密土,具有粒状架空的大孔隙结构<sup>[1]</sup>。黄土对水有特殊的敏感性,即在浸水的时候甚至于增湿的时候均会发生强度大幅度降低和变形大幅度突增的特性<sup>[2]</sup>。湿陷性是水敏性在变形方面的一种具体表现,黄土的湿陷现象正是因为水的渗透浸润而引起的,因而湿陷的发展受黄土土体的渗透特性直接影响着。在湿陷性黄土地区的工程实践中,渗透性是一个极其重要的指标,对渗透特性的试验和研究对岩土工程和工程地质领域具有非常重要的理论意义和实际应用价值,只有充分地了解其渗透的规律性,才能科学的、经济的、合理的指导工程设计。黄土的渗透性质主要受土颗粒的组成、土的孔隙比、土的结构和水的黏滞性等的影响<sup>[3]</sup>。作为黄土重要组成部分的黏粒,巨大的比表面积使其具有很大的吸附能力而影响土中的水流速度,同时,细小的黏粒对较大孔隙的镶嵌填充也对土中的水流通道的有阻挡作用,所以黏粒含量对土的渗透能力必然有较大影响。关于黄土渗透性国内外很多专家进行了较多研究,取得了丰硕的成果。许健等<sup>[4]</sup>研究了围压、初始含水率及冻融次数对原状黄土渗透系数的影响。文杰等<sup>[5]</sup>和刘保健等<sup>[6]</sup>研究了黄土非饱和渗透系数与含水率、时间及空间关系。Leong<sup>[7]</sup>、王铁行等<sup>[8,11]</sup>、王辉等<sup>[9]</sup>、赵彦旭等<sup>[10]</sup>、洪勃等<sup>[12]</sup>研究了干密度对黄土渗透系数的影响。Fredlund 等<sup>[13]</sup>、Van Genuchten<sup>[14]</sup>、卢应发等<sup>[15]</sup>、李萍等<sup>[16]</sup>通过土—水特征曲线和经验公式,间接预测了非饱和土渗透系数。高永宝等<sup>[17]</sup>利用水—气运动联合测试量测渗透系数。李永乐等<sup>[18]</sup>对直接测定非饱和土渗透性方面进行了研究。朱建华<sup>[19]</sup>、Chan 等<sup>[20]</sup>、梁燕等<sup>[21]</sup>等研究了原状黄土渗透性的各向异性及形成机制。Crawford<sup>[22]</sup>研究了孔隙的各向异性以及孔隙边界的形状等对黄土饱和与非饱和渗透系数的影响。肖东辉等<sup>[24]</sup>研究了冻融作用对黄土渗透性的影响。AN Peng<sup>[25]</sup>研究了渗流时间对黄土的渗透性的影响。

Haeri 等<sup>[26]</sup>研究了初始含水率、初始干密度以及洪水压力对原状和重塑黄土湿陷潜能和渗透系数的影响。然而,由于天然黄土级配的差异性较大,通过现场取样难以获得较为理想的在其他粒组含量相同条件下的不同黏粒含量序列,因此关于在其他粒组含量基本相同的条件下针对黏粒含量对黄土渗透性影响的相关研究工作尚少导致对黏粒含量对渗透系数的影响及其微观机理尚难以把握。基于此,本文通过自制负压湿筛装置筛选了其他粒组基本不变条件下的不同黏粒含量的黄土试样,采用静压法将不同黏粒含量的扰动黄土制备成相同天然干密度水平下不同含水率的试样进行饱和渗透试验,分析其他粒组不变情况下黏粒含量对黄土渗透系数的影响规律,初始含水率对黄土渗透系数的影响规律,并基于 SEM 图像对其微观机理进行分析,其相关认识为黄土及其渗透性相关的理论与工程实践提供了重要的基础依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验黄土的性质

本试验所用黄土为晚更新世  $Q_3$  黄土,原始土样取自延安新区 I 期工程挖山填沟挖方工程新鲜剖面,自地表以下 4 m 深度处人工切取土样,土样取出后标定其上下表面并用保鲜膜包裹。试验所用黄土的物理指标详见表 1。为了制备不同黏粒含量的黄土试样,需对风干后的黄土土样进行分选,同时为了更好的研究黏粒对黄土渗透性的影响,本次试验土样先后经过 0.5 mm 圆孔标准筛除去石砾,再通过自制负压湿筛装置筛选不同黏粒含量的黄土土样,以实现黄土试样中黏粒含量的人为可控,并利用激光粒度仪对土样的黏粒含量进行跟踪测定。由于延安地区原始黄土土样的黏粒含量均在 20%~25% 之间,故本次试验以 24% 黏粒含量为上限建立序列,通过自制负压湿筛装置分别获得黏粒含量为 12%, 16%, 20%, 24% 的黄土土样,经过激光粒度仪测定,颗粒分布曲线如图 1 所示。

表 1 试验所用黄土的物理指标

取样深度/m	天然密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	天然含水率/%	土粒相对 密度	塑限/%	液限/%	塑性指数 $I_p$
4	1.65	14.01	2.71	16.8	31.5	14.7

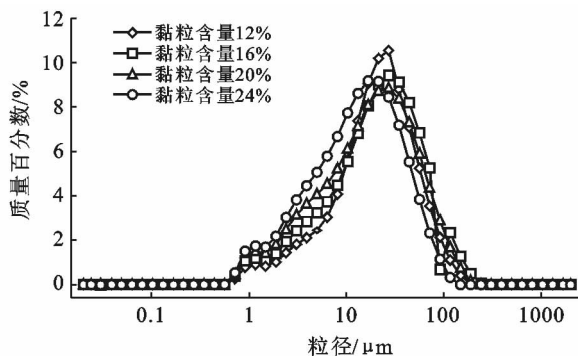


图 1 黄土土样颗粒分布曲线

## 1.2 试验方法

将筛选后的其他粒组不变而黏粒含量不同的黄土样加水调和静置,分别配制成含水率为 12%, 14%, 16%, 18%, 20% 的土样。然后将调配好的土样放入保湿皿使试样表层的水渗入到其内部,直至试样含水率均匀,再按同一干密度称取对应质量的土样,用静压法将其压入渗透环刀内,制成截面积为  $30 \text{ cm}^2$ ,高度为 4 cm 的试样,置于保湿皿中备用。目前,在实验室中测定渗透系数的仪器种类和试验方法很多,但从原理上大体可分为常水头法和变水头法两种。相对来说,变水头法试验过程中水头差一直在随时间变化,可以比较准确地测定出低渗材料的渗透系数,考虑到黄土渗透系数一般都在  $10^{-4} \text{ cm/s}$  以下,因此本试验采用变水头法,选用 TST-55 型渗透仪进行试验。在进行微观电镜试验时,将不同黏粒含量的黄土试样切成  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  (长×宽×高)的型样,置于室内自然风干,然后采用环氧树脂、丙酮、乙二胺、二丁酯 4 种试剂的混合液体对试样进行硬化。待其充分硬化后,用切割机将粘结在土样周围多余的环氧树脂切除、研磨和抛光,然后对其进行喷碳处理,以保证试样断面具有良好的导电性,再将试样用导电胶带粘在载玻片上放置于 Quanta FEG 450 扫描电子显微镜载物台进行微观观察和图像拍摄。最后,通过扫描电镜拍摄不同黏粒含量的电镜试样照片,分析不同黏粒含量试样微观结构上的差异,从而分析其对渗透性的影响。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 黏粒含量对黄土渗透性的影响

图 2—3 所示为黄土渗透系数与黏粒含量之间的

关系曲线及其拟合关系。从图 2—3 中可以看出,黏粒含量对黄土渗透性影响显著,在同一含水率条件下,随着黏粒含量的增多,其渗透系数减小,渗透系数与黏粒含量呈显著指数函数负相关关系,且相关系数都在 0.9 以上。分析其原因,首先,黏粒以分散质点式的形式充填在试样的粒间空隙中,颗粒排列比较疏松,颗粒表面也比较干净,孔隙发育。随着黏粒含量的增加,赋存在骨架颗粒周围的黏粒逐渐聚集,或者在骨架颗粒的周围定向排列,构成连续的黏土薄膜粘附在颗粒表面,呈薄膜状(葱皮结构),黏土薄膜的存在大大减小了孔隙的有效半径,并且常常造成孔隙吼道的堵塞。

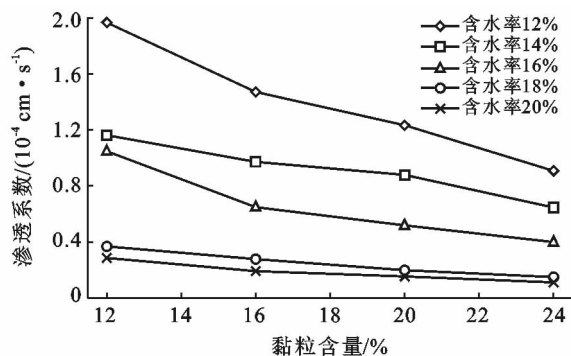


图 2 黄土渗透系数与黏粒含量关系曲线

随着黏粒含量的进一步增加,黏粒晶粒由颗粒表面延伸、穿越、切割孔隙空间,与孔隙共生绞缠,骨架颗粒就逐渐被包埋在黏粒物质中,颗粒之间完全由黏粒物质连接(嵌埋状),使试样原有的粒间孔隙被切割,变迁呈迂回曲折,成为黏粒晶粒之间的微细孔隙。黏粒物质作为黄土的胶结材料,其含量、赋存位置和赋存状态的不同均可导致孔隙特征和渗透性的变化,黏粒物质包括黏土矿物如高岭石、伊利石、蒙脱石 3 种,部分高岭石是形成孔隙结构的骨架颗粒,而蒙脱石、伊利石主要以附着在颗粒表面和以胶结物的形式分布在骨架颗粒之间;还包括黏土粒级的微细碎屑,如石英,长石,云母,碳酸盐等,这些微细碎屑将骨架颗粒相互连接在一起<sup>[1,27]</sup>。黄土骨架颗粒的形态、排列方式及胶结物的作用形式决定了黄土中孔隙的分布及有效连通孔隙的比例,这种微观胶结结构导致了其独特的渗透特性。其次,黏粒中的黏土矿物特别是强亲水的黏土矿物由于其高分散性和巨大的表面积而具有显著的黏着性和吸附性。

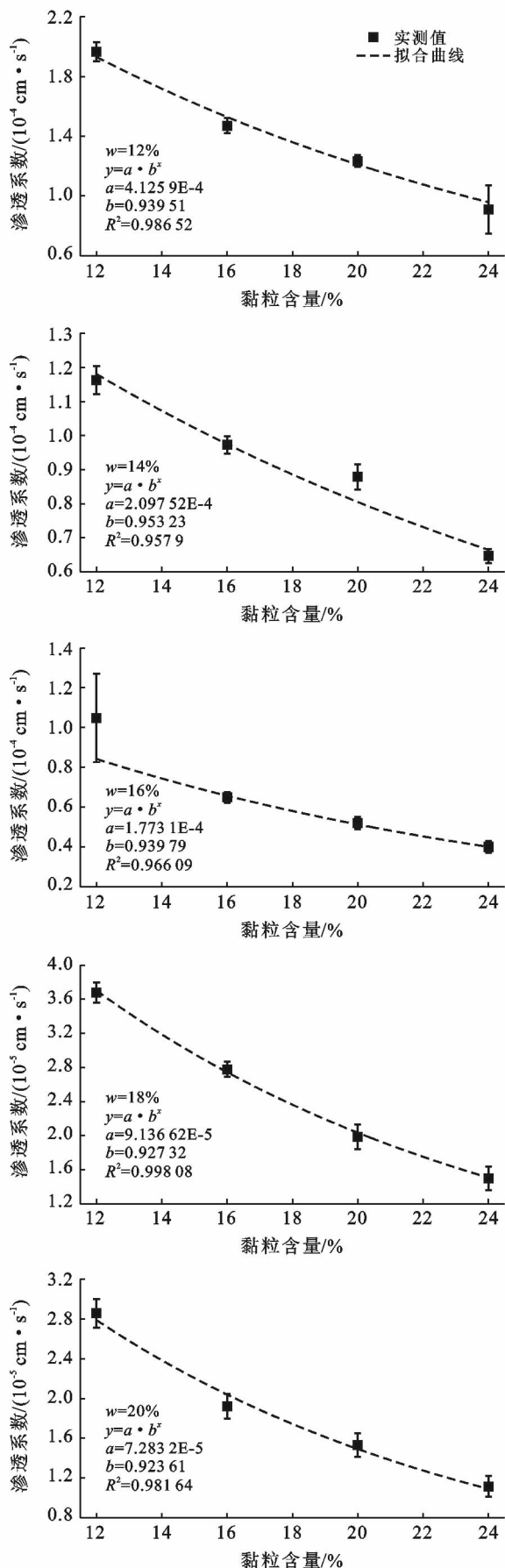


图3 黄土渗透系数与黏粒含量拟合关系

黄土高原黄土的主要黏土矿物成分为中等混层比的蒙脱石/伊利石混层矿物,作为一种膨胀性黏土矿物,中等混层比的蒙脱石/伊利石混层矿物不仅具有很强的的亲水性,而且具有涨缩特性,在渗透过程会引起晶体膨胀和絮凝作用,导致黏土胶团体积变大,封闭孔隙吼道。从根本上来说,渗透系数的降低是由于黄土在浸水后黏土矿物水化膨胀和微粒运移所引起的<sup>[27-28]</sup>。黄土的膨胀主要决定于它的黏土矿物、吸附阳离子、可溶盐等的成分和含量,土在浸水后,黏粒进一步水化,吸附水膜厚度增加,因而土粒产生了膨胀。由于土样周围上下均受到刚性限制,不能向四外扩展,所以膨胀的土粒只好向粒间的孔隙发展。土中可溶盐的不断溶出,土中水的可溶盐浓度逐渐减少,土粒表面吸附水膜随之逐渐增厚, $\zeta$  电位也因之增高,因而土粒获得了新的膨胀,且继续向粒间孔隙发展。同时,在渗透过程中,高岭石大都离散开并松散的附着在孔隙壁上,或作为粒间的填充物,直径 10  $\mu\text{m}$  左右的单个黏粒在水动力作用下或在化学与水动力的联合作用下,可随水流自由通过并迁移,而 20  $\mu\text{m}$  左右的黏粒则多形成卷状或积聚起来。当运移到孔隙的狭小处遇阻,或在孔道的转弯处碰撞孔壁,或水流的流速降低,或者在漩流的作用下把微粒推向孔壁,都可以使微粒沉积在孔道中减小孔道的流通尺寸,或聚集堵塞在孔道的狭小处严重降低孔道的流通性,而使渗透性降低,渗透系数下降;伊利石和蒙脱石/伊利石的混合体大多形成为颗粒连接体,他们紧紧粘附于颗粒壁上,形成一连续和紧密联系的黏粒“外衣”,当水进入试样系统时,每一个黏土颗粒周围会吸附并形成一层水膜,从而使渗透系数下降<sup>[28]</sup>。渗透系数随着黏粒含量的增加而减小,黏粒含量的增加还会引起引起土体孔隙弯曲因子的增加,也会导致渗透系数的减小<sup>[29]</sup>。这主要是因为黏粒含量越多,则在相同的孔隙比条件下相对形成的微孔隙通道越多,大孔隙通道相对较少。

## 2.2 含水率对黄土渗透性的影响

图 4—5 为黄土渗透系数和含水率关系曲线及其拟合关系。从图中可以看出,在黏粒含量一定时,渗透系数随初始含水率的增大而减小,呈指数函数负相关关系,且有数量级变化,说明初始含水率是影响黄土渗透系数变化的重要因素。分析其原因,主要是由于试样中胶结物因初始含水率的不同,其赋存位置、赋存状态可能不同。黄土中的主要胶结物是黏土矿物,而黏土矿物主要有高岭石、伊利石、蒙脱石三种,部分高岭石是形成孔隙结构的骨架颗粒,而蒙脱石、伊利石主要以附着在颗粒表面和以胶结物的形式分

布在骨架颗粒之间<sup>[27]</sup>。黄土骨架颗粒的排列方式及胶结物赋存状态决定了黄土中孔隙的分布及孔隙的连通性,这种微观胶结结构导致其特有的水理性质。同时,初始含水率也会影响试样的击实效果,从而影响其微观结构<sup>[30]</sup>。此外,随着试样的初始含水率的增大,水分润滑作用增加,土颗粒散体间结合水膜变厚,颗粒及团聚间引力变弱,颗粒便于移动,加之水膜的润滑作用,使得颗粒能够更好地嵌合,从而形成更加细密、分布均匀的细小孔隙。同时,黏粒中黏土矿物的黏性随含水率的增加也得以充分发挥,吸水膨胀后越来越多的填充到土样内部的空隙中,或使得孔隙喉道堵塞而导致孔隙连通性降低,渗透系数下降。当黏粒含量为 12% 时(图 4),渗透系数随含水量的增长变化异常。主要是由于在黏粒含量较低时,黄土试样结构疏松,粒间孔隙发育(受颗粒成分决定,黏粒含量越低,粒间孔隙越发育),形成连通性较好的有效渗流喉道,黄土骨架颗粒各种排列方式和连接形式交替存在,在黏粒含量较多的位置,其表面积大,含水量增大时,土粒表面薄膜水的加厚而使土粒逐渐膨胀,缩小了颗粒间孔隙而使渗透系数变小,而在黏粒赋存较少

的位置,颗粒间孔隙不随含水率增长而变化,渗透系数几乎不变。由图 4 还可以看出,当初始含水率由 12% 增至 18% 时,渗透系数变化显著,渗透系数随初始含水率的增加显著变化,分析其原因,首先,由于含水量较低,团聚体自身结构强度较高而粒间水膜楔入力小,试样微观结构表现为松散的集粒结构,具有成片分布的粒间孔隙,颗粒或团粒的分布秩序性较差,土体不易被充分压实。其次,由于初始含水量较小胶结物的黏性尚不能发挥,不能建立起有效的黏连效果。

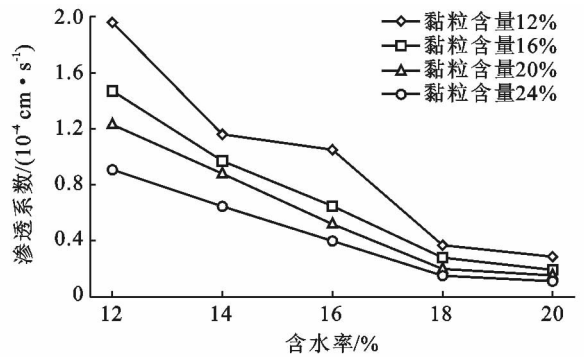


图 4 黄土渗透系数与含水率关系

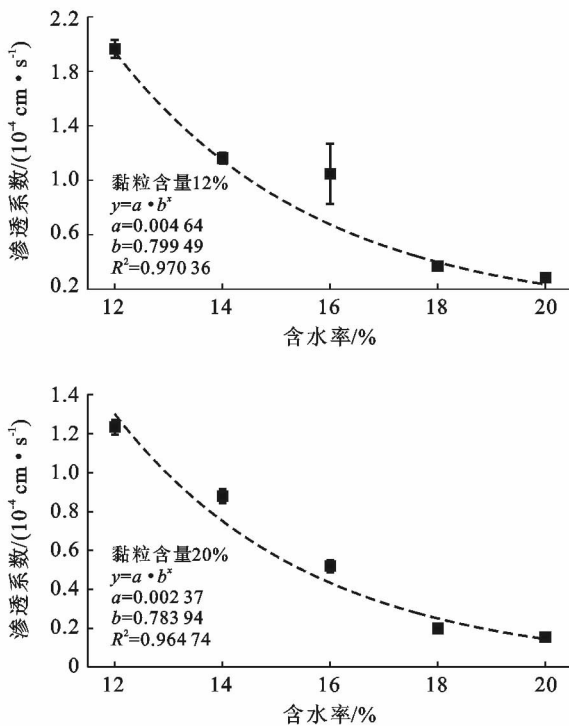


图 5 黄土渗透系数与含水率拟合关系

### 2.3 微观结构

土体微观结构可通过颗粒形态(颗粒大小,颗粒形状,表面起伏),颗粒排列和连接形式,孔隙特征(孔隙大小,孔隙分布情况),颗粒接触关系等特性来描述。图 6 为不同黏粒含量黄土试样放大倍数为 800

倍的微观 SEM 图片。

由图 6 可以看出,随着黏粒含量的增加,黏粒以不同形式充填于孔隙中使土样由颗粒体结构变为颗粒—团粒体结构,骨架颗粒之间的连接由接触连接逐渐变为胶结连接,颗粒的排列方式由架空变为架空—

镶嵌再渐变成为镶嵌。黏粒含量较低时,土颗粒相互支撑、排列疏松,形成较大的孔隙。随着黏粒含量的增多,骨架颗粒排列明显变得紧密,黄土微观结构逐渐趋于密实,同时大量黏粒物质吸附于颗粒表面,形成

缝隙状狭长孔隙。大、中孔隙数量明显减少,孔隙的分布不再均匀,孔隙内填充着大量黏粒和微细物质,或使得孔隙喉道堵塞,形成更多微细孔隙,孔隙连通性降低,从而影响渗透系数。

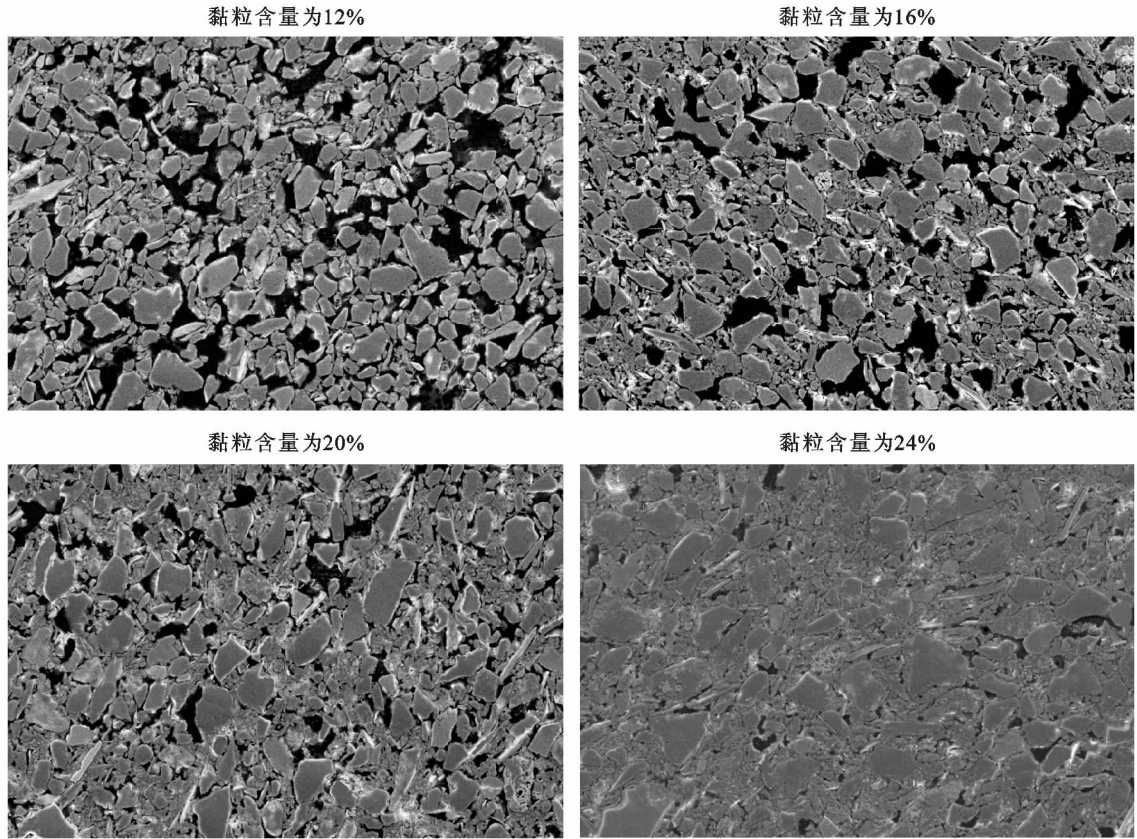


图 6 不同黏粒含量黄土试样微观结构

孔隙是土体内不同粒径的颗粒及胶结物等基本单元体以不同形式组合排列而成的,是微观结构分析的重要研究对象之一。本文采用参考文献[30]的分类方法进行分类,对放大 800 倍的 SEM 图像借助 Image-Pro Plus 6.0(IPP)软件处理后,按照以上分类标准,统计得到了不同黏粒含量下黄土孔隙数量百分比以及孔隙面积变化的分布直方图。图 7 为不同黏粒含量黄土样各类孔隙数量百分比直方图,从图中可以看出,随着黏粒含量的增加,微孔隙所占比例增加,中、小孔隙所占比例减少。图 8 为各类孔隙截面积及总孔隙截面积直方图,从图中可以看出,随着黏粒含量的增加,中、小孔隙面积减小,微孔隙面积增加,黄土试样的总面积呈减小趋势。说明黏粒含量的变化可以改变试样的粒径级配和土样孔隙孔径,进而改变试样的孔隙大小,所以黏粒含量的多少必然影响试样的渗透性。同时,随着黏粒含量的增加,土样孔隙率会逐渐减小,从而改变了土体的微观结构,导致土体孔隙结构发生变化,进而影响到土体的渗透性。

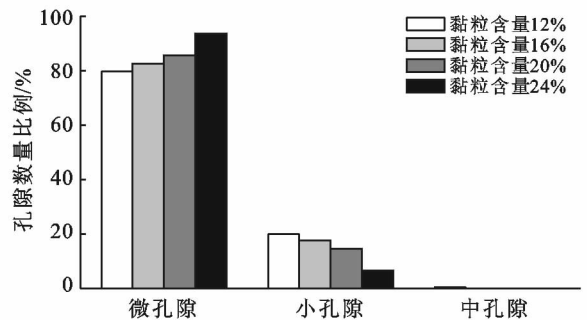


图 7 不同黏粒含量黄土样各类孔隙数量比例

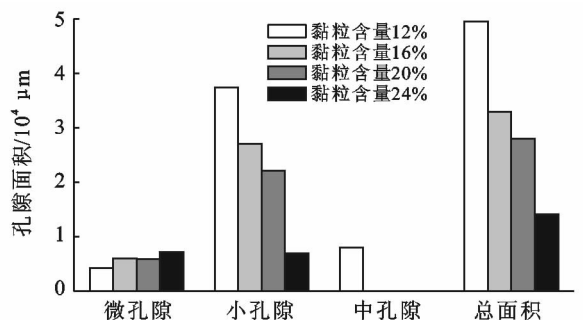


图 8 各类孔隙截面积及总孔隙截面积

### 3 结论

(1) 黏粒含量对黄土渗透性影响显著,在同一含水率条件下,随着黏粒含量的增多,其渗透系数减小,渗透系数与黏粒含量呈显著指数函数负相关关系。

(2) 在黏粒含量一定时,渗透系数随初始含水率的增大而减小,呈指数函数负相关关系,且有数量级变化,说明初始含水率也是影响黄土渗透系数变化的重要因素。

(3) 黏粒含量对渗透系数的影响,主要是由于黏粒含量的增多,导致其微观结构由分散结构变为致密结构,颗粒接触由支架接触变为镶嵌接触,颗粒连接由小桥连接(葱皮连接)变为嵌埋状连接,孔隙由支架大孔变为黏粒间微小孔隙,一定程度上都降低了黄土的渗透性。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王永焱. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [2] 赵景波. 黄土研究的历史和展望[J]. 地学工程进展, 1998(1):16-22.
- [3] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:水利电力出版社, 1983.
- [4] 许健,王掌权,任建威,等. 原状黄土冻融过程渗透特性试验研究[J]. 水利学报,2016,47(9):1208-1217.
- [5] 文杰,韩金良,姚磊华,等. 原位非饱和黄土渗透系数研究[J]. 岩土力学,2015,36(9):2599-2606.
- [6] 刘保健,谢永利,于友成. 黄土非饱和入渗规律原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4156-4156.
- [7] Leong E C, Rahardjo H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1997,123(12):1118-1126.
- [8] 王铁行,卢靖,张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006,25(11):2364-2368.
- [9] 王辉,岳祖润,叶朝良. 原状黄土及重塑黄土渗透特性的试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2009, 22(2):20-22.
- [10] 赵彦旭,张虎元,吕擎峰,等. 压实黄土非饱和渗透系数试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(6):1809-1812.
- [11] 王铁行,杨涛,鲁洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. 岩土力学,2016,37(S1):72-78.
- [12] 洪勃,李喜安,陈广东,等. 重塑马兰黄土渗透性试验研究[J]. 工程地质学报,2016,24(2):276-283.
- [13] Fredlund D G, Xing A, Huang S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the [J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 1994, 31(4): 159A-159A.
- [14] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(44): 892-898.
- [15] 卢应发,陈高峰,罗先启,等. 土-水特征曲线及其相关性研究[J]. 岩土力学,2008,29(9):2481-2486.
- [16] 李萍,李同录,王红,等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs&Collis-Geroge 模型预测[J]. 岩土力学,2013,34(S2):184-189.
- [17] 高永宝,刘奉银,李宁. 确定非饱和土渗透特性的一种新方法[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(18):3258-3261.
- [18] 李永乐,刘翠然,刘海宁,等. 非饱和土的渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(22):3861-3865.
- [19] 朱建华. 土坝心墙原状土的三轴渗透试验[J]. 岩土工程学报,1989,11(4):57-63.
- [20] Chan H T, Kenny T C. Laboratory investigation of permeability ratio of new liskeard soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973,10(3):453-472.
- [21] 梁燕,邢鲜丽,李同录,等. 晚更新世黄土渗透性的各向异性及其机制研究[J]. 岩土力学,2012,33(5):37-42.
- [22] Crawford J W. The relationship between structure and the hydraulic conductivity of soil[J]. European Journal of Soil Science, 2010,45(45):493-502.
- [23] Crawford J W. The relationship between structure and the hydraulic conductivity of soil[J]. European Journal of Soil Science, 2010,45(45):493-502.
- [24] 肖东辉,冯文杰,张泽,等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J]. 冰川冻土,2014,36(5):1192-1198.
- [25] An Peng, Zhang Ai-jun, Liu Hong-tai, et al. Degradation mechanism of long-term seepage and permeability analysis of remolded saturated loess[J]. Rock & Soil Mechanics, 2013, 34(7):1965-1971.
- [26] Haeri S M, Zamani A, Garakani A A. Collapse potential and permeability of undisturbed and remolded loessial soil samples[C]// European Conference on Unsaturated Soils. Napoli, Italy, Jun. 2012:301-308.
- [27] 张永双,曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. 工程地质学报,2005,13(1):18-28.
- [28] Bunn A R. Mobilization of natural colloids from an iron oxide-coated sand aquifer: Effect of pH and ionic strength[J]. Environmental Science & Technology, 2002,36(3):314-322.
- [29] 徐永福,兰守奇,孙德安,等. 一种能测量应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):160-164.
- [30] 杨晶. 黄土状压实填土压缩和强度特性研究[D]. 山西太原:太原理工大学,2014.