



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.025

曲兆昆, 王华敬, 寻万福, 等. 基于压汞法的改良土渗透特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 172-178. QU Z K, WANG H J, XUN W F, et al. Study on permeability characteristics of modified soil based on mercury intrusion[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 172-178. (in Chinese)

基于压汞法的改良土渗透特性研究

曲兆昆¹, 王华敬¹, 寻万福¹, 刘福胜¹, 卞汉兵^{1,2}

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018;

2. LEM3, CNRS 7239, 洛林大学, 梅兹 法国 57045)

摘要: 为探讨改良剂(水泥、固化剂)对土壤渗透性及微观孔隙分布的影响机理,以平原水库粉质黏土为研究对象,采用渗透试验和压汞试验,对改良土的渗透系数及微观孔隙进行研究。结果表明:固化剂使孔隙体积变小,降低改良土的渗透系数,但并非呈线性减小关系;当掺量为2%时,水泥和固化剂之间产生较大的抑制作用。固化剂速凝,可明显缩短施工周期,为工程抢修提供新的发展方向。水泥对改良土渗透性影响最大,随着水泥掺量增加,土体内部由大孔隙向小孔隙过渡。当龄期超过7 d,土体渗透性降幅较大,大孔、中孔含量减少,微孔、极微孔逐渐增多;该研究建立了渗透系数与大孔、中大孔孔隙率的函数关系,为改良土作为防渗材料的稳定性分析提供理论依据。

关键词: 渗透试验;压汞试验;离子固化剂;孔隙分布;速凝;量化

中图分类号: TU42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0172-07

Study on permeability characteristics of modified soil based on mercury intrusion

QU Zhaokun¹, WANG Huajing¹, XUN Wanfu¹, LIU Fusheng¹, BIAN Hanbing^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. LEM3 CNRS 7239, Université de Lorraine, 57045 Metz, France)

Abstract: In order to study the effect of the modifier (cement and curing agent) on the soil permeability and micro pore distribution, we studied the permeability of the modified soil and the micro pores using the permeability test and the mercury intrusion test, with the silty clay in plain reservoirs as the research object. The results showed that the curing agent reduced the pore volume and the permeability coefficient of the modified soil, but the decline was not linear. When the content was 2%, there was an obvious inhibitory effect between the cement and the curing agent. The fast hardening of the curing agent could significantly shorten the construction period. This points out a new direction for engineering repair. In addition, the cement had the greatest influence on the permeability of modified soil. With the increase of cement content, the large pores within the soil would transition to small pores. After 7 days, the soil permeability declined sharply, the amount of large and intermediate pores decreased, and the micro pores and ultramicro pores increased. This study has established a functional relationship between the permeability coefficient and the porosity of large pores and medium large pores, and can provide a theoretical basis for the stability analysis of the modified soil as impervious material.

Key words: permeability test; mercury intrusion test; ion curing agent; pore distribution; fast hardening; quantify

收稿日期: 2017-04-27 修回日期: 2017-08-05 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1025.012.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAB07B05); 山东省省级水利科研及技术推广项目(SDSLKY201305)

Funds: Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program (2015BAB07B05); Shandong Provincial Water Conservancy Research and Technology Promotion Project (SDSLKY201305)

作者简介: 曲兆昆(1992-), 男, 山东菏泽人, 主要从事岩土方面的研究。E-mail: quzhaokun2012@163.com

通讯作者: 刘福胜(1964-), 男, 山东潍坊人, 教授, 主要从事水工结构等方面的研究。E-mail: liufsh@sdau.edu.cn

平原水库作为一种调控水资源的有效方式,近年来建设力度逐渐加大。渗透性作为工程风险检测的重要指标之一,对平原水库安全经济地运行起着至关重要的作用。而平原水库地区多属于第四系冲积地层,一般为砂黏土,筑坝土料条件较差,渗透系数在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ 范围之间,渗透性较强,在水流作用下易对坝体产生渗漏侵蚀,甚至引发溃坝坍塌等事故,严重威胁水库周边人民的生命财产安全。同时,坝体渗漏会造成水库周围土壤沼泽化、盐渍化等现象,给生态环境遭到破坏埋下隐患。为了解决土壤渗透问题,国内外学者已进行了初步探索,大多通过外添改性材料的方法,提高土壤的抗渗性。

沈珠江^[1]院士提出土体结构性是 21 世纪土力学的核心问题,而研究发现,渗透性不仅受土质物理特性、外加剂、温度、龄期等因素的影响,与其它力学性能之间也密切相关^[2,9]。随着机械科学的进步,学者们开始尝试从微观孔隙角度解释宏观的渗透特性,针对土壤渗透的微观作用机制,也分别提出了不同的理论模型假设,并通过计算机模拟、理论推导、技术手段(GIS、SEM、CT、MIP 及 XRD 衍射)等,分析水分在土壤中的运移情况,验证假设模型的可行性,并提取改良土体的微观结构特征,研究影响土体渗透的主要孔径范围,探讨改良剂对土体孔径变化的影响规律,在微观与宏观之间建立关系^[10,21]。

压汞法作为材料孔隙特征分析的常用方法之一,因能够精确地量化材料内部孔隙形态、测径范围宽等优点,而得以广泛应用。王升福等^[22]通过压汞法对软黏土压缩、冻融前后孔径变化进行试验研究,揭示了压缩及冻融对土体孔体积和孔表面积影响的微观机制。张涛等^[23]借助压汞试验,探讨了木质素对改良粉土的微观孔隙变化的影响规律。目前,利用压汞法分析土壤微观孔隙结构的研究颇多,但对改良土的微观研究还处于初步探索阶段。市面上的外加剂种类中,固化剂是土力学领域研究的热点,但因种类繁多,和水泥土之间的反应机理较复杂,对渗透影响的定量研究还甚少。本文通过添加改良剂,达到减小内部孔隙、提高平原水库坝体土质抗渗性的目的,使土壤的渗透系数控制在 10^{-6} cm/s 量级及以下,为平原水库的安全运行提供理论保障;并借助压汞试验,从微观层面上分析该类离子固化剂对土壤渗透性的影响规律。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验用土为平原水库粉质黏土,根据课题组前期试验成果发现,干密度对改良土的渗透性影响非

常小,可忽略不计。本文在进行试验时,将干密度默认控制为 1.72 g/cm^3 。压实度 98.3%,含水率 18%,塑性指数(I_P) 12.9。固化剂为离子固化剂,主要成分为纳米级的铝离子溶液。高浓度的固化剂溶液比较稳定,不会受到周围环境的影响而变质。水泥为普通的硅酸盐水泥。

按照《土工试验规程(SL 237-1999)》要求,对土样进行基本的物理参数试验,试验结果见表 1,其击实试验曲线见图 1。

表 1 试验土壤的基本物理性质
Tab. 1 The basic physical properties of test soil

参数	液限 W_L (%)	塑限 W_P (%)	最优含水率 (%)	最大干密度 ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
测试值	32	19.1	18	1.75

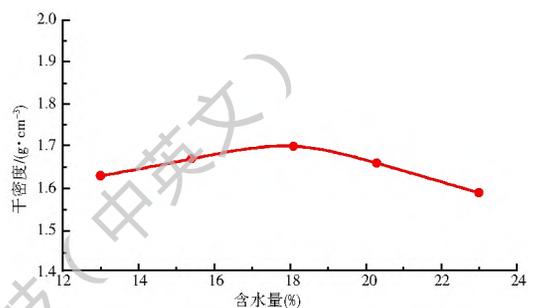


图 1 击实试验曲线

Fig. 1 Compaction test curve

1.2 试验设计

该试验涉及到固化剂、水泥和龄期三种因素,为研究各种因素对改良土的渗透性影响,故设计 10 组不同配比的土样进行渗透和压汞试验,对改良土进行微观定量分析,力图从微观角度阐明各因素对改良土壤渗透性能的影响机理。由于设计的试验较多,且前期试验中,各因素纯粹作为单因素,其余因素完全不考虑时,改良土的渗透结果不佳(其中涉及到水泥与固化剂在不同龄期阶段的结合反应)。故考虑其他因素的基础上,进行试验设计。为方便起见,每组试验配比采用简单的代号表示,如 C13+A14+T7 表示水泥掺量为 13%,以 Al^{3+} 为主要成分的固化材料掺量为 4%,养护龄期为 7 d。

1.3 试验方法

将试验用土盛放于托盘,在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中放置 8 h,土壤充分干燥后,经碎土器破碎或碾散,过 5 mm 细筛,按照不同配比,制备用于渗透试验与压汞试验的两组土样(每组 3 个)。其中,重塑土制样时,注意先用玻璃棒将水与土拌和匀实,放入塑料袋中密封静置 24 h 后再制备土样。由于水泥和固化剂遇水立即发生反应,故改良土制样时,拌匀即制备土样。将土样置于标准养护室养护至规定龄期后,

采用室内变水头法测定土样的渗透系数,压汞法测定土样微观形态。渗透仪为南京仪器厂生产的“南-55”变水头渗透仪,压汞仪为全自动孔径分析仪 PorosityMaster33 系列,分为低压注汞和高压注汞两个过程,可测量压强范围为:0 783 PSI-33000 PSI,测量孔径 0 005~ 1 080 μm,可充分反映土体内部的孔隙分布情况。

2 试验结果分析

2.1 改良土的试验结果分析

固化剂、水泥与龄期皆作为相对单因素变量单独进行试验设计与结果分析,10 组不同配比土样的渗透系数见表 2。水泥掺量为 13%,7 d 龄期时,不同固化剂掺量的渗透曲线和压汞曲线见图 2。固化剂掺量为 2%,7 d 龄期时,不同水泥掺量的渗透曲

线和压汞曲线见图 3。水泥掺量为 13%,固化剂掺量为 4%时,不同龄期的渗透曲线和压汞曲线见图 4。土壤内部的孔隙分布情况见表 3、图 5。

表 2 试验配比方案及渗透试验结果

序号	配比	渗透系数/($e^{-6}cm \cdot s^{-1}$)
1	C13+ A10+ T7	7.946
2	C13+ A11+ T7	8.067
3	C13+ A12+ T7	7.702
4	C13+ A14+ T7	7.536
5	C13+ A14+ T28	1.704
6	C13+ A14+ T3	7.793
7	C9+ A12+ T7	8.466
8	C7+ A12+ T7	9.568
9	C0+ A10+ T1	20.303
10	C9+ A12+ T1	9.838

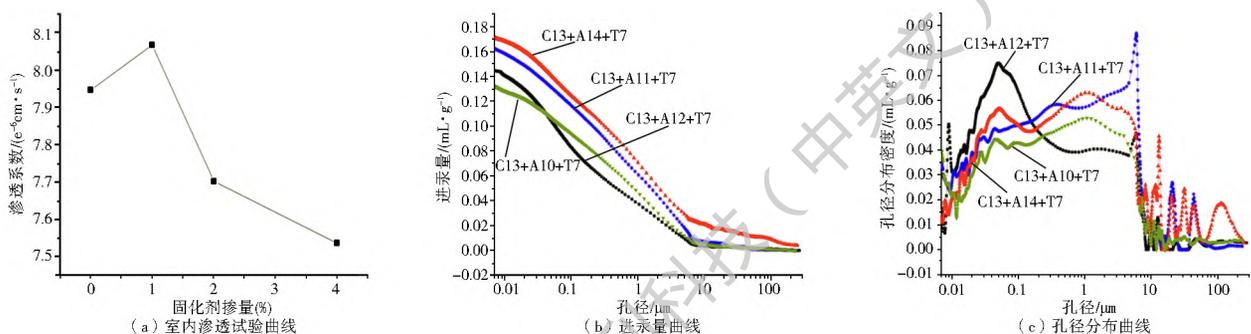


图 2 不同固化剂掺量的试验曲线

Fig. 2 The test curves of different curing agent contents

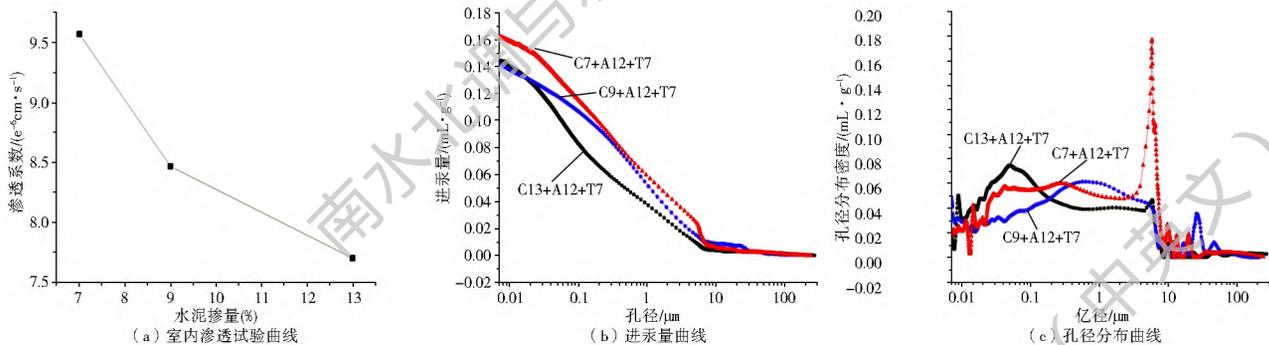


图 3 不同水泥掺量的试验曲线

Fig. 3 The test curves of different cement contents

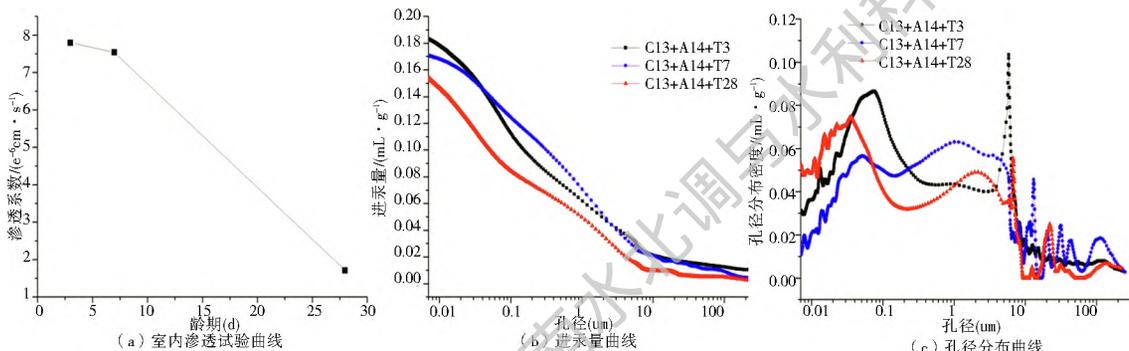


图 4 不同龄期的试验曲线

Fig. 4 The test curves of different ages

表3 孔隙率分布

Tab.3 Porosity distribution table (%)

配比	极微孔隙	微孔隙	小孔隙	中小孔隙	中大孔隙
C13+ A10+ T7	1.36	1.82	2.73	0.59	0.15
C13+ A11+ T7	2.82	3.68	5.29	1.71	0.49
C13+ A12+ T7	2.61	2.98	2.58	0.74	0.20
C13+ A14+ T7	1.50	1.98	2.98	0.75	0.20
C13+ A14+ T28	3.67	2.26	3.01	0.69	0.35
C13+ A14+ T3	3.90	3.63	3.23	1.04	0.74
C9+ A12+ T7	1.28	1.75	3.12	0.67	0.16
C7+ A12+ T7	1.42	2.13	2.44	0.91	0.50
C0+ A10+ T1	2.01	3.56	5.63	0.88	1.52
C9+ A12+ T1	2.06	2.85	3.38	0.84	0.94

2.2 不同固化剂掺量的试验结果比较

图2表示固化剂掺量为0%、1%、2%和4%时的试验曲线,由图2(a)可知,改良土的渗透系数随固化剂掺量的增加呈先增大后减小趋势。当固化剂掺量在0~1%范围时,改良土壤的渗透系数随着固化剂掺量的增加而增大。当固化剂掺量在1%~2%范围时,能显著降低改良土的渗透系数;当固化剂的掺量为2%~4%时,随固化剂掺量的增加,改良土渗透系数降幅较缓。原因:固化剂中的负离子与土壤颗粒表面的正离子发生中和反应,造成土壤颗粒表面的离子缺位,破坏了土壤颗粒表面的双电层结构。颗粒缺位区域粒子显中性,在土壤表面迅速板化,颗粒由亲水过渡到泌水状态,结构趋于稳定。与此同时,Al³⁺与土壤表面的正离子(K⁺、Na⁺)迅速发生交换反应,破坏了土壤颗粒表面的吸附水膜,削弱了土壤颗粒的吸水能力。没有水膜隔阂的颗粒之间斥力减弱,相互吸引衔接,形成所谓的“抱团”现象。

进汞曲线反映改良土的内部孔隙体积变化,由图2(b)可知,固化剂掺量为2%的进汞曲线位于掺量为0%、1%、4%的进汞曲线的下面,说明其改良土内部孔隙体积最小。对比发现,1%和4%固化剂掺量的进汞曲线都位于0%固化剂掺量的进汞曲线上,表明1%和4%掺量未能减小改良土内部孔隙。原因:当1%掺量,固化剂掺量较少,固化剂速凝,颗粒间大孔、中孔增加,渗透系数增大;当2%掺量时,大孔、中孔含量减少,微孔、极微孔明显增多,渗透系数大幅度降低。表明固化剂受到水泥水化的抑制力,没有继续发生固化。当4%掺量时,大孔和中孔相对增多,但之前产生胶结物质堵塞了部分大孔隙,尽管大孔、中孔含量增多,其并非皆为连通孔隙,故渗透系数不升反降。孔径分布曲线反映的是孔隙空间体积的变化幅度^[24]。由图2(c)可知,

配比 C13+ A11+ T7 和 C13+ A12+ T7 的改良土孔径呈单峰分布,孔径的主分布区间分别为 0.1~5 μm、0.03~0.1 μm,而配比 C13+ A10+ T7 和 C13+ A14+ T7 的改良土孔径分布曲线峰型不明显,但呈现出清晰的孔隙变化趋势。

综合渗透系数和孔隙变化特征,对比其他掺量,发现2%掺量的固化剂对有效地改良土内部孔隙,降低渗透系数的效果最显著。

2.3 不同水泥掺量的试验结果比较

图3表示水泥掺量为7%、9%和13%时的试验曲线,由图3(a)可知,随着水泥掺量的增加,改良土渗透系数呈非线性减小趋势。相对素土而言,渗透系数减少一个数量级。当水泥掺量在7%~9%范围时,渗透系数降幅较大,减少率为11.5%;当水泥掺量在9%~13%范围时,渗透系数降幅较小,减少率为9%。原因:(1)水泥中的C₃A和C₃S和土中水发生水解反应,生成水化硅酸钙(C-S-H凝胶)、氢氧化钙(Ca(OH)₂)、和水化铝酸钙(3CaO·Al₂O₃·6H₂O)等微颗粒胶凝物质。胶凝物质堵塞部分连通孔隙,渗透路径极大地减少。(2)土壤矿物表面吸附的K⁺和Na⁺和游离的Ca²⁺、Al³⁺离子产生交换作用,土壤颗粒初步团粒化,土壤颗粒收缩脱掉土壤中的水分子,土体结构更加密实。

由图3(b)可知,水泥掺量越多,进汞曲线位置越低,说明水泥能改变土体的孔隙形态,其掺量越多,孔隙体积越小。由图3(c)可知,配比为C7+ A12+ T7的改良土呈单峰分布,孔径主要分布在5~10 μm区间内。配比为C9+ A12+ T7改良土孔径分布曲线峰型不明显,孔径主要分布在0.3~3 μm。配比为C13+ A12+ T7改良土孔径的主分布区间为0.05~0.3 μm。从图3(c)可知,水泥掺量增多,孔隙入口直径相应减小,孔径分布曲线存在由大孔径向小孔径过渡趋势。

2.4 不同龄期的试验结果比较

图4表示龄期为3 d、7 d和28 d时的试验曲线,由图4(a)可知,改良土的渗透系数随着龄期的延长整体呈降低趋势。7 d龄期之前的改良土渗透系数降幅较小,7 d以后改良土渗透系数降幅较大,但仍维持在同一数量级之间。原因:(1)短时间内,固化剂速凝,使内部孔隙体积变大,抑制了水泥水化。(2)随着龄期的增长,水泥水化产物铝酸钙和土壤溶液中的硫酸根离子进一步结合,消耗一部分水分子,生成钙矾石(Aft)晶体。另外颗粒表层碳化产生的CaCO₃物质,也会对水流产生一定的阻滞

作用。

由图 4(b) 可知, 相比于 3 d、7 d 龄期的进汞曲线, 28 d 龄期的进汞曲线位于最下面, 说明随着龄期的增长, 孔隙体积逐渐减小。而 3 d 与 7 d 龄期的进汞曲线存在部分交集, 说明 3 d 到 7 d 期间, 土体内部反应比较剧烈, 孔隙转化相对集中。表明只要龄期得当, 便可达到减小孔隙体积的目的。由图 4(c) 可知, 不同龄期的改良土孔径分布曲线整体上呈双峰分布, 28 d 龄期的最大分布孔径明显小于 3 d、7 d 的最大分布孔径。表明随着龄期的增长, 改良土内部不断地进行物理化学反应, 生成物不断地堵塞孔隙, 孔隙体积逐渐减小, 结构趋于密实, 渗透系数呈现出降低趋势。

2.5 孔隙分布情况

国内外学者对土壤内部孔隙的划分有不同标准。Shear^[25] 在以往学者的研究基础上, 从土壤颗粒、团粒层面对土壤孔隙进行微观划分; 张平^[26] 根

据不同的干燥方法, 对重塑膨润土孔隙进行划分。本文在试验的基础上, 结合土质特点以及实测的孔隙分布规律, 将改良粉质黏土微观孔隙划分为: 极微孔隙、微孔隙、小孔、中小孔、中大孔、大孔六类。其中直径小于 50 nm 的孔隙为极微孔隙, 主要为颗粒内孔隙; 直径为 50~300 nm 的孔隙为微孔隙, 主要为颗粒间孔隙; 直径为 300~3 000 nm 的孔隙为小孔隙, 主要为团粒内和颗粒间孔隙; 直径为 3 000~6 000 nm 的孔隙为中小孔隙, 大部分为团粒内孔隙, 但是存在少许颗粒间孔隙; 直径为 6 000~10 000 nm 的孔隙为中大孔隙, 主要为团粒内孔隙; 直径大于 10 000 nm 的孔隙为大孔隙, 主要为团粒间孔隙。

根据上述的孔隙划分标准, 利用压汞试验数据, 可分别计算出每组改良土的孔隙分布情况。图 5 为不同类型孔隙的相对含量柱状图, 表 3 为每组土样不同孔隙的孔隙率情况。

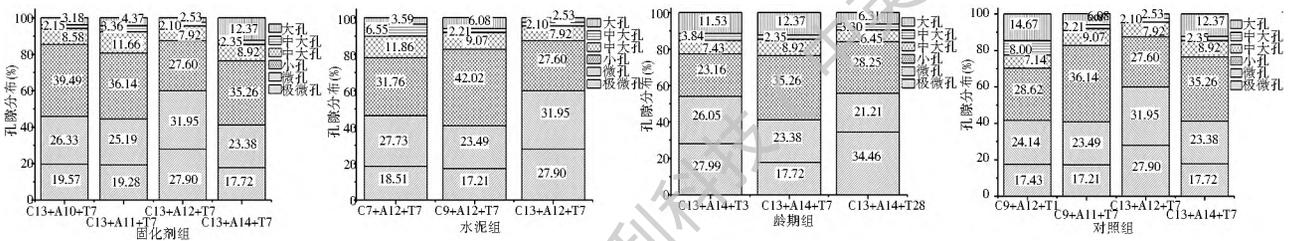


图 5 不同类型孔隙的相对含量柱状图

Fig. 5 The relative content histogram of different types of pores

短时间内, 水泥与固化剂皆可改变土体内部孔隙结构。由图 5(a) 可知, 当固化剂掺量分别为 1% 与 4% 时, 水泥和固化剂与土中水、土颗粒之间的结合较快。土体内部的大中孔隙占比皆高于未掺固化剂时的占比, 说明此时固化剂与水泥的抑制作用较小; 当固化剂掺量为 2% 时, 改良土体内部的大中孔隙占比最少, 而此时固化剂与水泥之间的相互抑制作用较大, 能有效减缓对方水化的速度, 防止“抱团”现象, 从而固化剂和土壤生成的胶结物质不断填充于孔隙之间, 颗粒间孔隙减少, 微孔和极微孔含量增多, 占孔体积的 60% 左右。由图 5(b) 可知, 水泥掺量从 7% 增加到 9% 时, 大孔、小孔数量增多, 中孔数量减少(小孔隙增幅最大, 为 32.3%), 对于微孔和极微孔影响甚小。当掺量为 13% 时, 土体内部大、中、小孔数量皆存在不同幅度的减小(小孔隙减幅最大, 为 34.3%), 极微孔和微孔明显增多。由图 5(c) 可知, 在一定的配比下, 7 d 龄期之前, 对团粒内和颗粒间孔隙影响较大, 渗透系数减幅较小; 7 d 龄期之后, 对大、中孔隙影响较显著, 渗透系数减幅较大。由图 5(d) 可知, 配比 C13+ A14+ T7 的大孔、中孔含量

多于配比 C9+ A12+ T7, 而配比 C13+ A12+ T7 的大孔、中孔含量少于配比 C9+ A12+ T7, 表明 2% 掺量的固化剂与 13% 掺量的水泥之间相互抑制作用尤为显著, 使土体的大孔、中孔急剧减少, 短时间内提高土体抗渗性, 对于工程的抢险保修提供了保障。

由图 5(a) 可知, 当固化剂为 1% 时, 土体内大孔、中孔的含量明显增多, 渗透系数增大; 由图 5(b) 与图 5(c) 可知, 水泥的增加和龄期的延长使大孔、中孔的含量降低, 渗透系数减小, 与有关学者得出的大、中孔隙对渗透系数有决定意义结论相吻合^[27]。在本文中, 改良土的渗透系数与大孔、中大孔隙率的相关性较高, 通过多元非线性回归(符合 t 检验与 F 检验)分析, 建立了渗透系数与孔隙间的函数关系:

$$k = 11.29 - 4.40m - 11.91n - 19.79mn + 23.61m^2 + 11.56n^2 \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数 (e^{-6} cm/s); m 为中大孔隙率 (%); n 为大孔隙率 (%)。

3 结论

以平原水库粉质黏土为研究对象, 采用室内渗

透、压汞试验方法,对改良后粉质黏土的渗透系数与微观孔隙分布规律进行了研究,得到以下结论。

(1) 借助压汞试验,从微观上解释了改良土渗透机理,实现了微观和宏观的有机结合。分析发现,水泥、固化剂和龄期等因素使天然密度下土壤的渗透系数降低一个数量级,使极微孔隙、微孔隙数量增多,大、中孔隙数量减少,满足防渗要求。

(2) 固化剂掺量对渗透系数数量级影响幅度较小,使改良土在较小范围内浮动。固化剂和水泥之间存在相互抑制作用,当固化剂掺量2%、水泥掺量13%时,抑制作用最大。此时改良土内部大、中大孔隙数量较少,结构较密实。该类离子固化剂的速凝作用,具有实际工程意义。

(3) 水泥掺量对土壤渗透性及小孔隙含量的影响较大,掺量越多,土壤渗透系数越小;当掺量为9%时,渗透系数显著减小。

(4) 龄期7 d后,改良土内部反应开始趋缓。根据实际工程,建议将改良土养护7天以上。

(5) 根据渗透系数与大孔、中大孔孔隙率之间的函数关系,由土体渗透系数的变化可反映内部孔隙形态的演变,为实际工程的渗流安全性评价提供了一定的理论支持。

参考文献(References):

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97. (SHEN Z J. Mathematical model of soil structure—the key problem of soil mechanics in twenty-first Century[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97. (in Chinese))
- [2] 王念秦, 刘晓玲, 王庆涛, 等. 降雨作用下马兰黄土渗透规律实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 131-134. (WANG N Q, LIU X L, WANG Q T, et al. A study of the permeability of the Malan loess under rainfall[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 131-134. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2014.03.015.
- [3] 陈开圣, 彭小平. 关中地区黄土的湿陷特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 37-40. (CHEN K S, PENG X P. Study on loess's collapsibility in the Guanzhong area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(1): 37-40. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2005.01.009.
- [4] 寺师昌明, 奥村树郎, 光本司. 石灰安定处理土的基本特性に関する研究. 第1报. 港湾技术研究所报告[R], 1977, 16(1): 3-28. (Terashi Changmin, Okumura Juro, Mitsumoto Tsukasa. The basic characteristics of lime treated soil stability in turn on continued research. First. The Port and Harbour Research Institute Report[R], 1977, 16(1): 3-28. (in Chinese))
- [5] 师华强, 倪万魁, 刘魁, 等. 冻融循环作用对黄土压缩性的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 45-48. (SHI H Q, NI W K, LIU K, et al. The impact of the freezing thawing cycle to

- compression of the loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(3): 45-48. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2012.03.009
- [6] 谌柳明, 戴小松, 徐顺平. 水泥固化东湖淤泥的工程性质试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 131-135. (CHEN L M, DAI X S, XU S P. Behavior of cement stabilized sludge in East Lake[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 131-135. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2016.02.023.
- [7] 闫宁霞, 杜志坚. 中壤土质条件下固化土的合理技术指标研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 215-218. (YAN N X, DU Z J. Research on mechanics characteristic of solid soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4): 215-218. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-7601.2005.04.044.
- [8] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554. (TANG Y X, LIU H L, ZHU W. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549-554. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-4548.2000.05.008.
- [9] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. SSA土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 45-49. (ZHANG L P, ZHANG X C, SUN Q. Effects of SSA soil stabilizer on compaction, shear strength and permeability characteristics of loess[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 45-49. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.008.
- [10] 简文彬, 张登, 黄春香. 水泥-水玻璃固化软土的微观机理研究[A]. 第一届全国软土工程学术会议暨上海市岩土力学与工程2013年学术年会论文集[C]. 上海, 2013. (JIAN W B, ZHANG D, HUANG C X. Micromechanism of cement-sodium silicate stabilized soft soils[A]. Proceedings of the First National Academic Conference on Soft Soil Engineering and the 2013 Academic Conference on Geotechnical Mechanics and Engineering in Shanghai[C]. Shanghai, 2013. (in Chinese))
- [11] 张保祥, 张心彬, 黄乾, 等. 基于GIS的地下水易污性评价系统[J]. 水文地质工程地质, 2009, (6): 26-31. (ZHANG B X, ZHANG X B, HUANG Q, et al. Groundwater vulnerability assessment system based on GIS[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009(6): 26-31. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2009.06.018.
- [12] 赵晓龙, 邱秀梅, 卞汉兵, 等. 一种非饱和土相对渗透系数的试验数值联合估计法[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1114-1117, 1150. (ZHAO X L, QIU X M, BIAN H B, et al. A combination method of experimental and numerical estimations for predicting the relative hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1114-1117, 1150. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2015.06.020.
- [13] MAO L, LI Y, HAO W, et al. A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green-Ampt model[J]. Soil and Tillage Research, 2016(161): 31-37. DOI: 10.1016/j.still.2016.03.003.

- [14] LIANG C P, HSU S Y, CHEN J S. An analytical model for solute transport in an infiltration tracer test in soil with a shallow groundwater table[J]. *Journal of Hydrology*, 2016 (540): 129-141. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.069.
- [15] SUN D, LI X, FENG P, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope during rainfall infiltration using coupled liquid-gas-solid three-phase model[J]. *Water Science and Engineering*, 2016(9): 183-194. DOI: 10.1016/j.wse.2016.06.008.
- [16] SASANIAN S, NEWSON T A. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents[J]. *Engineering Geology*, 2013 (158): 15-22. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.03.002.
- [17] 欧勇, 王乃根, 尚俊伟. 南水北调东线八里湾泵站渗透稳定分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(1): 110-113, 130. (OU Y, WANG N G, SHANG J W. Seepage stability analysis of Baliwan pumping station in the eastern route of South to North Water Transfer Project [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(1): 110-113, 130. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01110.
- [18] 徐超, 李丹, 黄亮. 水泥膨润土泥浆固结体渗透性与微观结构的关系[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 36(6): 819-823. (XU C, LI D, HUANG L. Relationship between permeability and microstructure of cement bentonite slurry concretion [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 36(6): 819-823. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2011.06.006.
- [19] 张虎元, 彭宇, 王学文, 等. 抗疏力固化剂改性黄土进失水能力研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 19-26. (ZHANG H Y, PENG Y, WANG X W, et al. Water entrance and release ability of loess soil modified by consolid system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 19-26. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S1.002.
- [20] 郑娜, 马巍, 李国玉, 等. 一个考虑冻融循环作用的结构定量参数的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(7): 1339-1344. (ZHENG Y, MA W, LI G Y, et al. Laboratory study on quantitative parameter of structural characteristics of soils considering effect of freeze-thaw cycles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(7): 1339-1344. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201607023.
- [21] 张可霓, 王洋. 非饱和砂-膨润土混合物渗流过程实验的数值模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(3): 57-62. (ZHANG K N, WANG Y. Numerical simulation for resaturation processes of unsaturated sand-bentonite mixtures [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(3): 57-62. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.03057.
- [22] 王升福, 杨平, 刘贯荣, 等. 人工冻融软黏土微观孔隙变化及分形特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(7): 1254-1261. (WANG S F, YANG P, LIU G R, et al. Micro pore change and fractal characteristics of artificial freeze-thaw soft clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(7): 1254-1261. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201607012.
- [23] 张涛, 刘松玉, 蔡国军, 等. 木质素改良粉土热学与力学特性相关性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(10): 1876-1885. (ZHANG T, LIU S Y, CAI G J, et al. Experimental study on relationship between thermal and mechanical properties of treated silt by lignin [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1876-1885. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201510016.
- [24] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(12): 3591-3596, 3603. (DING J W, HONG Z S, LIU S Y. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3591-3596, 3603. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2011.12.006.
- [25] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay [R]. Washington D C: National Academy Press, 1993: 1365-1370.
- [26] 张平, 房营光, 闫小庆, 等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(S1): 388-391. (ZHANG P, FANG Y G, YAN X Q, et al. Study of different dry methods for drying remolded bentonite sample with mercury intrusion test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 388-391. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2011.S1.044.
- [27] 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 B, ZHANG H Y, ZHAO T Y, et al. Responsibility of permeability of modified loess soil on microstructure [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(6): 96-101. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2011.06.024.