



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.021

高燕燕, 钱会, 杨佳, 等. 重塑马兰黄土渗透性的室内试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 130-136. GAO Yanyan, QIAN Hui, YANG Jia, et al. Indoor experimental study on permeability characteristics of remolded Malan Loess[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 130-136. (in Chinese)

## 重塑马兰黄土渗透性的室内试验研究

高燕燕, 钱会, 杨佳, 冯晶, 霍晨琛

(长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054)

**摘要:** 基于室内常规渗透试验, 对延安新区重塑马兰黄土不同压实度下的渗透性进行研究, 分析了饱和渗透系数随颗粒大小、孔隙度及干密度等因素的变化规律。试验数据拟合结果表明, 该地区重塑马兰黄土的饱和渗透系数与孔隙度呈正指数函数关系, 与干密度呈负指数函数关系。此外, 不同干密度情况下, 饱和渗透系数随时间变化的统计结果表明, 当干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时, 重塑马兰黄土的渗透系数不再随渗透时间变化, 基本趋于稳定, 且渗透性能低, 因此可采用此干密度为不同要求和标准的地基压实工程提供参考和指导。

**关键词:** 重塑马兰黄土; 饱和渗透系数; 孔隙度; 干密度; 渗透时间

**中图分类号:** TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0130-07

### Indoor experimental study on permeability characteristics of remolded Malan Loess

GAO Yanyan, QIAN Hui, YANG Jia, FENG Jing, HUO Chenchen

(School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In this study, indoor routine permeability experiments were conducted to examine the saturated hydraulic conductivity of remolded Malan loess in Yan'an at different degree of compaction, and analyze the relationships between saturated hydraulic conductivity and several factors, including particle size, dry density and porosity. The results showed that saturated hydraulic conductivity had significant positive index correlation with porosity, and significant positive index correlation with dry density. Additionally, when the dry density was bigger than  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , the saturated hydraulic conductivity was not only stable with total permeability time, but also small enough to be considered as impermeability. Hence,  $1.6 \text{ g/cm}^3$  could be adopted to guide the compaction engineering of different standards.

**Key words:** remolded Malan loess; saturated hydraulic conductivity; porosity; dry density; permeability time

随着我国城镇化的快速发展, 山区城市人多地少的矛盾日益突出。近年来, 许多城市通过“削山造地”为城市建设开辟出新的发展空间, 其规模可达数十平方公里<sup>[1]</sup>。2012年8月启动的延安市“削山造地”工程计划造地面积  $78.5 \text{ km}^2$ , 是目前老城区面积的两倍。在黄土高原区, 如此大规模的土方工程

在世界建城史上尚无先例<sup>[1]</sup>。在造地过程中, 通过削山填沟把位于高地处的黄土移填到低洼处, 经重型机械层层压实后, 塑造大面积的平坦土地, 从而使黄土的原有结构遭到破坏, 人工填埋黄土成为含水层的重要组成部分, 其渗透性将随着填埋黄土的工后沉降不断地发生变化, 因此对“削山造地”工程中

收稿日期: 2015-08-23 修回日期: 2016-05-12 网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.0923.002.html>

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划(2012KTZD03-05); 国家自然科学基金(41572236)

Fund: Science and Technology Innovative Engineering Projects of Shaanxi Province(2012KTZD03-05); National Natural Science Foundation of China(41572236)

作者简介: 高燕燕(1990), 女, 河南新郑人, 博士, 主要从事干旱半干旱水资源可持续开发利用研究。E-mail: gaoyanyan3689@163.com

通讯作者: 钱会(1963), 男, 陕西泾阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

地下水环境变化的研究,离不开对重塑黄土渗透性变化规律的深入研究。

渗透性是黄土的重要工程性质之一,与黄土变形及强度等性质密切相关,对黄土湿陷性有直接影响。尤其在相对松散的土层中,当水发生渗透时,渗透力极易破坏土的结构,降低土的强度,从而诱发滑坡、地基与路基塌陷和工程失稳等事故。渗透系数是土层渗透性的表征参数,主要反映土层透水导水的能力,是基本的水文地质参数。近年来,诸多学者对黄土的渗透性开展了相关研究工作,王铁行<sup>[2]</sup>等人通过配置不同干密度的压实黄土土样,研究了非饱和黄土渗透系数的相关影响因素。杨博<sup>[3]</sup>等人通过对不同膨润土掺量的黄土试样的微结构和孔隙特征进行统计分析,并与渗透试验结果进行对比,发现大中孔隙对渗透系数有着决定意义。李广冬<sup>[4]</sup>等人通过杨凌地区黄土不同干密度的常规渗透试验和三轴渗透试验,对比分析了围压和干密度对渗透系数的影响。但目前的研究还难以解决“削山造地”工程中填埋黄土渗透性的变化规律问题。这也是地面沉降问题研究中遇到的棘手问题,薛禹群院士<sup>[5]</sup>早在2006年就撰文指出应根据自己的试验资料建立更合适的表达式。因此,本文采集延安新区削山填沟工程挖方区的马兰黄土,选取孔隙度与干密度作为反映黄土压实度的主要因子,基于常规渗透试验,对不同压实度下重塑马兰黄土的渗透性能进行了研究,确定了马兰黄土饱和渗透系数随孔隙度及干密度的变化规律,为黄土地区人工填埋区的地下水水环境变化研究及工程建设提供基础资料和参考。

## 1 试验原理

测定黄土渗透系数有多种方法,在室内渗透试验中,依据试验仪器类型的不同有三轴渗透试验及常规渗透试验。三轴渗透试验考虑了土体所受复杂应力因素的影响<sup>[4]</sup>,但施加压力过程中,土体内外受力不均,在饱水的情况下,易发生不均匀变形,进而导致所测得渗透系数代表性较差。常规渗透试验采用击实试验方法制备一定压实度(以土样的干密度或孔隙度来表征)下的一系列均质试样,通过室内渗透试验求取相应压实度下土样的渗透系数。由于试验采用的是常规的达西试验方法,因此试验结果可信度高。本文即采用这种方法,利用TST-55型渗透仪对重塑黄土的饱和渗透系数进行研究。常规渗透试验分为常水头渗透试验和变水头渗透试验。

依据土工试验标准<sup>[6]</sup>,对于粗粒土一般采用常水头渗透试验方法,对于细粒土则采用变水头试验方法。这是因为粗粒土渗透速度较快,而且粒径较大,若采用变水头试验方法,环刀尺寸较小故代表性差,水头降速快不易读取且误差较大。细粒土渗透速度相对较慢,若采用常水头试验装置,所需土体多且难于达到密度均匀及饱和状态。黄土为细粒土,依据土工试验标准,应采用变水头试验方法,但在本试验中,采用变水头试验装置同时进行常水头渗透试验,克服了土样难于饱和的问题,且试验过程中渗流量要求达到25 ml,从而大大降低了试验误差。在整理试验结果中,将两种方法所测得的试验结果进行比对,从而排除偶然误差,确保试验结果的准确性。

常水头渗透试验主要依据达西定律<sup>[7]</sup>:

$$K_T = \frac{WL}{A \Delta H t} \quad (1)$$

式中: $K_T$ 为水温为 $T$ ℃时试样的渗透系数(cm/s); $W$ 为渗透达到稳定后 $t$ 时间段内的渗水量( $\text{cm}^3$ ); $L$ 为渗径(cm),即试样高度; $A$ 为试样的断面积( $\text{cm}^2$ ); $\Delta H$ 为试样上下游的水头差(cm)。

变水头渗透试验依据瞬时达西定律<sup>[6]</sup>:

$$K_T = \frac{2.3a \cdot L}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

式中:2.3为ln和 $\lg_{10}$ 的变换因数; $a$ 为变水头管的断面面积( $\text{cm}^2$ ); $t_1$ 、 $t_2$ 分别为测读水头的起始和终止时间(s); $h_1$ 、 $h_2$ 为起始和终止水头(cm)。

为避免温度变化引起的试验误差,本试验以20℃为标准温度,标准温度下的渗透系数按下式计算<sup>[6]</sup>:

$$K_{20} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (3)$$

式中: $K_{20}$ 为标准温度20℃时试样的渗透系数(cm/s); $\eta_{20}$ 为20℃时水的动力黏滞系数( $\text{kPa} \cdot \text{s}$ ); $\eta_T$ 为 $T$ ℃时水的动力黏滞系数( $\text{kPa} \cdot \text{s}$ )。

## 2 试验步骤

### 2.1 试验材料

对延安新区施工现场进行野外调查,查明该区黄土层较为齐全且厚度较大,其中马兰黄土可达数十米厚,在削山填沟现场存在较多机械挖取的新鲜剖面。在挖方区选取地层划分较明显且厚度相对较大的剖面进行散状马兰黄土取样,取样点位置见图1。马兰黄土的基本物理性质指标见表1,其中分选系数为 $2.07 < 2.5$ ,故土样分选性良好。

表 1 延安地区马兰黄土的物理性质指标

Tab. 1 Physical properties of Malan Loess from Yan'an

土样	颗粒/mm 组成占比例(%)			分选系数	不均匀系数	比重	液限 (%)	塑限 (%)	天然干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	类型	最优含水率(%)	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$
	< 0.005	0.005~0.05	> 0.05									
马兰黄土	16.6%	66.9%	16.5%	2.07	30.81	2.7	28.5	17.5	1.45~1.55	粉黄土	15.8	1.77

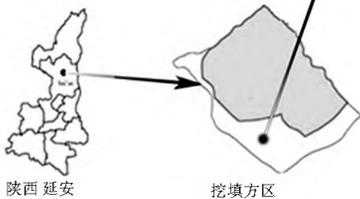


图 1 取样点位置

Fig. 1 Map of sampling site

## 2.2 土样制备

依据压实工程中常采用含水率为土方最优含水率 $\pm 2\%$ , 设定击实试验所用土样的质量含水率为 16%。将散状马兰黄土过筛(孔径为 2 mm)后, 在 110 °C 条件下烘干 8 h, 冷却后配制目标质量含水率为 16% 的土样。将配好的土样密封放置 24 h, 至土粒与水分充分混合均匀后, 测定实际含水率, 所测含水率与目标含水率之差不得大于 0.5%。

削山填沟工程中, 挖方区黄土经运移填埋到低洼处, 然后经机械层层碾压, 达到相应的压实度标准。在本室内试验中, 为探究填方区不同压实度与渗透系数的关系, 采用 JDS-1 型数控电动击实仪(单位体积击实功约为 592.2 kJ/m<sup>3</sup>) 对土样进行分层击实, 确保土柱密度均匀。依据马兰黄土的天然干密度与最大干密度, 设定试样干密度范围为 1.4~1.8 g/cm<sup>3</sup>, 制备 13 组不同干密度的试样。

击实后, 用液压千斤顶将土柱从击实筒中推出用于样品制备。使用直径为 61.8 mm, 高为 40 mm 的渗透环刀进行取样, 制备样品的过程中, 注意事项如下: (1) 应尽量取土柱中间部位的黄土进行制样, 从而避免击实过程产生周边土质疏密不同的情况。(2) 按压过程中应注意手部用力均匀, 尽量避免环刀内壁与土样之间出现缝隙。(3) 要保证取出的试样上下分别与环刀顶底边沿齐平, 不得出现大孔洞等现象。

## 2.3 渗透试验

采用自制变水头装置同时进行定水头和变水头试验, 试验装置见图 2。

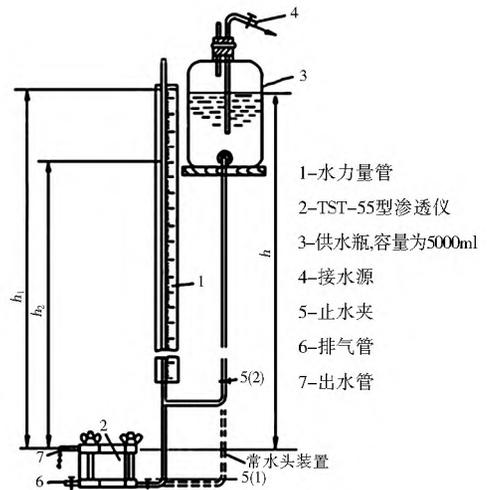


图 2 变水头(常水头)饱和和渗透试验装置示意图

Fig. 2 Sketch of variable(constant) head permeability apparatus

试验步骤如下。

(1) 对试样进行充分排水饱和后进行变水头渗透试验。将供水管用止水夹夹住, 记录此刻水位及时间。此后水头每下降 10 cm, 进行一次记录。每三个变水头作为一组, 一组读取完毕, 将水位回升, 重复上述步骤进行下一组数据的记录。

(2) 三组变水头试验完成后, 进行定水头渗透试验。将供水管的止水夹打开, 待水位稳定后, 测记水位。渗出水量大于 25 ml 时, 可移取量杯同时记录相应时间。

(3) 三组常水头试验数据读取完毕后, 再进行三组变水头渗透试验, 并与前述的三组变水头试验结果进行平均, 求得变水头渗透试验的平均渗透系数。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 常水头与变水头渗透试验结果对比

图 3 对比了常水头与变水头渗透试验的渗透系数结果, 可见常水头试验饱和和渗透系数均大于变水头试验饱和和渗透系数, 两者差值随着干密度增大而减小趋势。

从时间、水头、测管截面、水量等影响因素对两种渗透方法所得试验数据的相对误差进行分析, 结果见表 2。

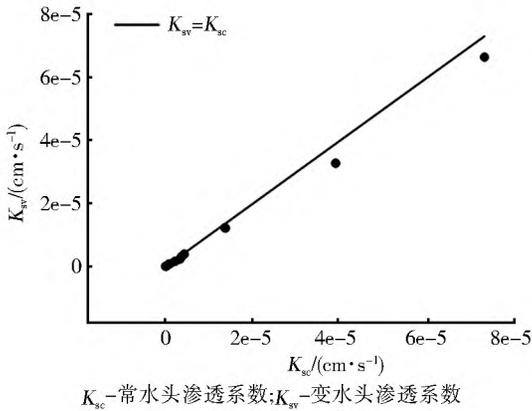


图 3 常水头与变水头渗透试验结果对比

Fig. 3 The comparison of  $K_{sc}$  and  $K_{sv}$

表 2 渗透试验结果误差分析

Tab. 2 Error analysis of permeation test results

试验方法	时间 (误差 1s)	水头(误差 0.5cm)	测管截面(误差 0.002cm <sup>2</sup> )	水量(误差 0.1ml)
变水头渗透试验	< 4%	0.7% ~ 5%	≈ 0.7%	—
常水头渗透试验	≤ 0.2%	≤ 0.3%	—	0.3% ~ 3%

两种试验中渗透系数计算结果产生差异的原因可归结为以下两点: (1) 仪器误差, 如测管上下截面的不均匀性, 测尺的刻度误差等。(2) 人为误差, 如计时的不精确, 读取水头和量取渗出水量体积时产生的误差等。

由于变水头渗透试验中, 受水头高度、时间、测管横截面积等诸多因素的影响较大。当水头下降到测管的不同位置时, 测管的横截面积有所不同, 但在实际操作和计算过程中, 一般将测管的平均截面积作为变水头管的断面积  $a$ 。且在团体配合读数和记录过程中, 存在一定的时间差, 尤其是在渗透速度较快的时候, 水头和时间均会产生相对较大的误差。几种因素相结合, 所测数据较易产生较大的误差。而常水头渗透试验主要受时间和水头影响, 且水头几乎恒定, 读取水头高度产生的误差一般小于 0.1 cm。由上述误差分析可以看出, 使用常水头渗透试验方法所得结果通常更为可靠, 且累计误差较小。

从试验原理上来看, 变水头渗透试验主要是依据测管下降水量作为渗入介质中的水量来计算  $W$ , 并采用瞬时方法计算。常水头渗透试验则是测定介质中渗出水量作为  $W$ , 来计算渗透系数。渗透系数是定量反应介质渗透性能的参数, 而透水性是指介质允许水透过的能力。因此, 依据常水头渗透试验

方法, 所得渗透系数更加科学。

因此, 在下文的分析中, 采用常水头渗透试验结果作为某干密度情况下的渗透系数。

### 3.2 孔隙度与饱和渗透系数的关系

影响渗透系数的内在因素是孔隙度、孔隙大小及孔隙连通性等<sup>[8]</sup>。因此研究孔隙度与饱和渗透系数的关系具有重要的意义, 也是解决“削山造地”工程中填埋黄土渗透性随沉降变化问题的关键。根据本次试验结果, 延安重塑马兰黄土的饱和渗透系数随孔隙度的变化关系见图 4:

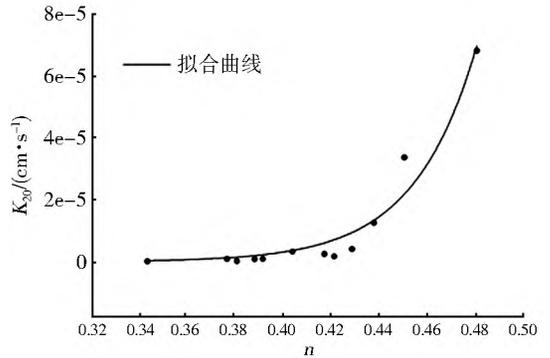


图 4 孔隙度与饱和渗透系数关系

Fig. 4 The relationship between porosity and saturated hydraulic conductivity

图 4 显示: 随孔隙度的增大, 渗透系数不断增大, 但是两者并非线性关系。对于研究区的马兰黄土, 可采用指数函数对重塑马兰黄土的试验结果进行拟合。结果表明两者关系可用下式表示:  $K_{20} = \exp[41.878 \times (n - 0.709)]$ , 相关系数  $R = 0.945$ 。Lambe<sup>[9]</sup>等学者研究表明渗透系数的对数与孔隙度呈直线关系, 陈明珠等<sup>[10]</sup>人在对贵州土体的渗透性研究中提出, 对于无黏性土, 孔隙比与渗透系数的对数呈线性相关, 但对于黏性土, 两者并不呈线性关系。对上述拟合公式进行对数变换得出  $\lg(K_{20}) = 18.208 \times (n - 0.709)$ 。显见, 本试验结果与前人结论相一致。为便于直观了解孔隙度与渗透系数的关系, 本文采用正指数形式。该方程可用于延安黄土填埋区地面沉降模型及地下水流模型, 通过孔隙度的变化不断修正渗透系数, 从而使水流模型反映实际压缩情况, 为更准确模拟压缩沉降和水流运动情况提供依据。

由图 4 的饱和渗透系数与孔隙度的拟合曲线可以看出: (1) 当孔隙度低于 0.43 时, 渗透系数随孔隙度的增大变化很小。渗透性很低, 渗透系数值在  $10^6 \sim 10^9$  cm/s。(2) 当孔隙度高于 0.43 时, 饱和渗透系数随孔隙度的增大急剧上升。可能原因是在该孔隙度下, 小孔隙所占比例相对较大且结构相当稳

定,而大孔隙所占比例较少。此时虽然孔隙度有所变化,但是有效孔隙度变化极小,因此饱和渗透系数变化很小。且当孔隙度大于 0.43 时,颗粒的排布较为疏松。随着孔隙度的增长,大孔隙和团块间的孔隙较为发育<sup>[11]</sup>。此时饱和渗透系数主要受到大孔隙的影响,随着孔隙度的增大,大孔隙的数量不断增加,因此渗透系数不断增大。

### 3.3 干密度与饱和渗透系数的关系

图 5 中同样采用指数函数对重塑马兰黄土的试验结果进行拟合。结果表明重塑马兰黄土的饱和渗透系数( $K_{20}$ )与干密度( $\rho_d$ )呈负指数关系,拟合曲线表达形式为: $K_{20} = 9.089 \times 10^4 \exp(-15.018 \times \rho_d)$ ,相关系数  $R = 0.995$ 。这与孔隙度和渗透系数关系式相似,但此处干密度与渗透系数呈负指数关系。这与其他学者对粉砂和陕北重塑红土干密度与饱和渗透系数关系的研究结果一致<sup>[12-13]</sup>。

由图 5 可以看出:重塑马兰黄土饱和渗透系数随着干密度的增大而变小,但变小的趋势逐渐减缓,当土的干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,随着干密度的增大,渗透系数几乎保持恒定,并处于很小的水平。据相关文献<sup>[9]</sup>对渗透性能的划分,此时土的渗透性能在低与极低之间。

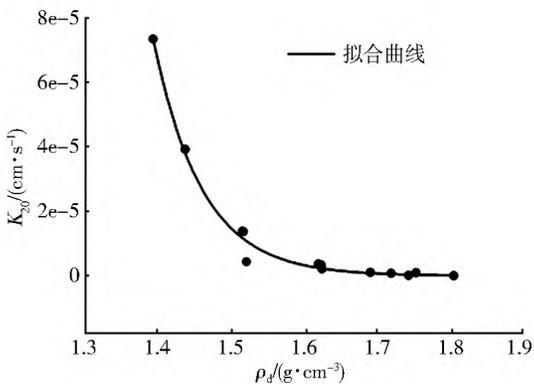


图 5 干密度与饱和渗透系数关系

Fig. 5 The relationship between dry bulk density and saturated hydraulic conductivity

在击实作用下,土样的干密度显著增大,饱和渗透系数减小。不同土样孔隙大小的分析结果表明压实作用下,孔隙会显著减小<sup>[14-15]</sup>。而土的压实取决于压实度和土粒抗压强度,在一定的压力下,集粒仍保持原有强度不发生变形,只有集粒间的结构受到压实的影响<sup>[16]</sup>。Li and Zhang(2009)<sup>[17]</sup>研究表明,在压实状态下集粒间的孔隙体积与压实黄土的最终孔隙比有密切的联系,并且在压实过程中,主要是集粒间的孔隙变化,因而压实必然会对黄土的渗透性能产生影响。当干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,大中孔

隙在整个土样中所占比例相当小,随着击实次数的增多,继续压实时土壤内部主要是粒团本身压缩及颗粒的重新排列<sup>[18]</sup>。李云峰<sup>[19]</sup>在洛川黄土渗透性研究中提出影响渗透系数的主要因素是孔隙大小,其次是孔隙度。可见在干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,土样的孔隙大小变化较小,此时渗透系数的变化就相对较小。

由于黄土的干密度可作为孔隙度及孔隙大小的外在综合表现,且其测定较为简易方便,因此可将黄土干密度用于实际工程中作为黄土压实程度的标准。根据上述讨论,对于本次试验中的马兰黄土,可以选取  $1.6 \text{ g/cm}^3$  作为与水有关工程中黄土压实的目标干密度,在此干密度下,渗透系数已经很小,黄土中特有的粒状架空体系已经丧失,这时黄土的湿陷及由此诱发的地面沉降将相对较小。

### 3.4 饱和渗透系数随渗透时间的变化

为较为全面了解渗透系数的变化过程,对重塑马兰黄土各干密度情况下,饱和渗透系数随时间的变化情况进行统计,结果见图 6:

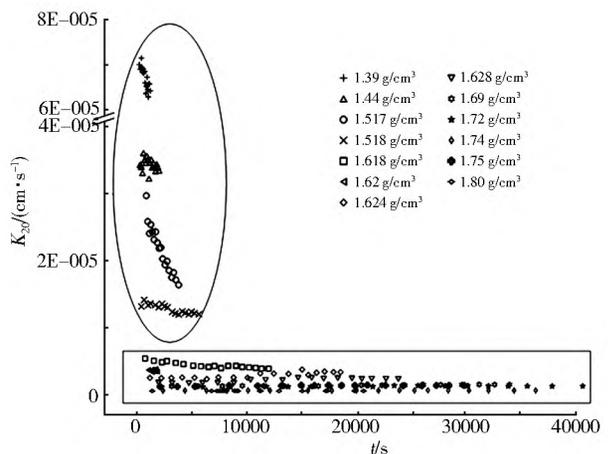


图 6 不同干密度情况下饱和渗透系数随渗透时间的变化

Fig. 6 The change of saturated hydraulic conductivity with time under different dry bulk density

从图 6 中可以看出,当土样的干密度小于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,饱和渗透系数随渗透时间的增长而减小,但随着干密度的不断增大,变化的速率不断减小;当干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,渗透系数随渗透时间的增长不再发生较大的变化,基本趋于稳定情况。

这主要是由于黄土中存在着一一定量的黏土矿物<sup>[20]</sup>,且主要以伊利石为主,还有高岭石、蒙脱石等。韩家懋<sup>[21]</sup>(1990)对洛川剖面矿物进行分析,发现马兰黄土黏粒中伊利石的平均含量高达 40.7%,高岭石平均含量则达 15.8%。这些矿物具有可塑性,遇水后易膨胀、软化和黏结。当干密度小于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,在渗透初始阶段,颗粒排布相对疏松,孔

隙及孔隙度相对而言均比较大。随着水流的不断入渗,黄土颗粒间的架空体系逐渐丧失,并且颗粒中的矿物成分与水接触后不断膨胀并黏结,导致水在孔隙间流动时,所受的阻力不断加大,因而随着渗透时间的增长渗透系数呈现逐渐减小的趋势。同时,土样的干密度越大,孔隙及孔隙度则越小,矿物成分虽然有所膨胀,但是由于空间限制,对水流的影响相对较小。因此,当干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,饱和渗透系数不再随时间发生较大变化。

重塑马兰黄土渗透性的这一特点,表明黄土的渗透性不仅与颗粒组成和结构特征等因素相关,而且与矿物成分等化学物质有十分密切的关系。同时,根据上述讨论,将干密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$  作为工程中的黄土压实的目标干密度,重塑马兰黄土的渗透性较低且稳定。

## 4 结论

本文采用常规渗透试验,对重塑马兰黄土的渗透性及其相关影响因素进行了深入分析。得到如下结论。

(1) 对比分析常水头和变水头饱和渗透系数的试验结果,发现常水头试验渗透系数均大于变水头试验。通过对试验结果进行误差分析和原理探究表明常水头渗透试验结果更为可靠。

(2) 重塑马兰黄土的饱和渗透系数随孔隙度的增大呈正指数形式增大,表达式为:  $K_{20} = \exp[41.878 \times (n - 0.709)]$ 。当孔隙度低于 0.43 时,重塑马兰黄土的饱和渗透系数随孔隙度增大变化较小。当孔隙度大于 0.43 时,饱和渗透系数随孔隙度增大变化较快。该公式的确立,可为黄土地区人工填埋区地面沉降及地下水水环境变化研究提供重要参考依据。

(3) 重塑马兰黄土饱和渗透系数随干密度的增大呈负指数形式减小,表达式为:  $K_{20} = 9.089 \times 10^4 \exp(-15.018 \times \rho_d)$ 。当干密度小于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,饱和渗透系数随干密度增大变化较快。当干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,饱和渗透系数变化较小且渗透性能很低。据此,可采用  $1.6 \text{ g/cm}^3$  的干密度作为实际工程中马兰黄土压实程度的标准。

(4) 重塑马兰黄土饱和渗透系数随时间增长而减小,但随干密度的增大,变化速率不断减小。在干密度大于  $1.6 \text{ g/cm}^3$  时,饱和渗透系数不随时间发生较大变化,较为稳定。

## 参考文献(References):

[1] Peiyue Li, Hui Qian, Jianhua Wu. Accelerate research on land

creation[J]. Nature, 2014(510): 29-31.

- [2] 王铁行, 卢靖, 张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和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. (WANG Tiehang, LU Jing, ZHANG Jianfeng. Experimental study on permeability coefficient of artificial compacted unsaturated loess considering influence of density [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2364-2368. (in Chinese))
- [3] 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 & Engineering Geology, 2011, 38(6): 96-101. (in Chinese))
- [4] 郭鸿, 骆亚生, 李广冬. 考虑地区差异性的饱和黄土三轴渗透试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(10): 112-114. (GUO Hong, LUO Yasheng, LI Guangdong. Experimental research on triaxial seepage test of saturated loess based on regional differences [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(10): 112-114. (in Chinese))
- [5] 薛禹群, 张云, 叶淑君, 等. 我国地面沉降若干问题研究[J]. 高校地质学报, 2006, 12(2): 153-160. (XUE YUQUN, ZHANG Yun, YE Shujun, et al. Research on the problems of land subsidence in China [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(2): 153-160. (in Chinese))
- [6] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S]. GB/T 50123-1999, Standard for soil experiment method[S]. (in Chinese)
- [7] 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]. 石家庄铁道学院学报: 自然科学版, 2009, 22(2): 20-22, 33. (WANG Hui, YUE ZRUN, YE Chaoliang. Experimental investigation of permeability of intact and reshaped loess [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute: Natural Science, 2009, 22(2): 20-22. (in Chinese))
- [8] A Alaoui, J Lipiec, H H Gerke. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 115-116: F15.
- [9] Lambe T W. Whitman S E. Soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1969.
- [10] 陈明珠, 阎长虹, 王玉英, 等. 土体渗透性影响因素—以普定陈旗堡为例[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(04): 66-70. (CHEN Mingzhu, YAN Changhong, WANG Yuying et al. The influence factors of soil permeability in Chenqibao village of Puding county [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(04): 66-70. (in Chinese))
- [11] 王永众, 林在贵. 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: 65-67. (WANG Yongzhong, LIN Zaiguan. The structural characteristics and physical mechanical property of loess soils in China [M]. Beijing: Science Press, 1990: 65-67. (in Chinese))
- [12] Huang S Y. Evaluation and Laboratory Measurement of the Coefficient of Permeability in Deformable Unsaturated Soils [D]. Saskatoon, Canada: University of Saskatchewan, 1994.
- [13] 陈伟, 李文平, 刘强强, 等. 陕北非饱和和重塑红土渗透特性试验

- 研究[J]. 工程地质学报, 2013, 22(1): 106-111. (CHEN Wei, LI Werrping, LIU Qiang qiang et al. Experimental research on permeability characteristics of unsaturated and remolded laterite in northern Shaanxi province[J]. Journal of Engineering Geology. 2013, 22(1): 106-111. (in Chinese))
- [14] 刘小龙. 土的不同渗透试验方法应用与研究[J]. 勘察科学技术, 2011(3): 36-39. (LIU Xiaolong. Application and study on different permeability test method of soil[J]. Editorial Office of Site Investigation Science and Technology. 2011(3): 36-39. (in Chinese))
- [15] Zhang S, Grip H, Lvdahl L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 90(1): 117 - 125.
- [16] Alakukku L. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic: I. Short term effects on the properties of clay and organic soils[J]. Soil & Tillage Research, 1996, 37: 211 - 222.
- [17] Li X, Zhang L M.. Characterization of dual structure pore size distribution of soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(2), 129-141.
- [18] 吴勇, 王伟, 王琛, 等. 干密度随粉煤灰力学性质的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(4): 247-249. (WU Yong, WANG Wei, WANG Chen et al. Effect of dry bulk density on mechanical properties of fly ash[J]. Sichuan Building Science. 2014, 40(4): 247-249. (in Chinese))
- [19] 李云峰. 孔隙是影响黄土层导水性的主导因素[J]. 勘察科学技术, 1991, (1): 25-28. (LI Yurfeng. Porosity is the chief influence factor of the water conductivity of loess soils[J]. Site Investigation Science and Technology, 1991(1): 25-28. (in Chinese))
- [20] 孙建中. 黄土学[M]. 香港: 香港考古学会出版, 2005: 142-148, 197-206. (SUN Jiannzhong. Loessology [M]. Hong Kong: Hong Kong archaeological society, 2005: 142-148, 197-206. (in Chinese))
- [21] 郑红韩, 顾雄飞, 韩家懋, 等. 中国黄土中的粘土矿物及其在剖面中的变化趋势——洛川和陇西黄土剖面的初步研究[J]. 中国第四纪研究, 1985(1): 158-165. (ZHENG Honghan, GU Xiongfei, HAN Jiamao et al. Clay minerals in loess of China and their tendency in loess section[J]. Quaternary Sciences, 1985(1): 158-165. (in Chinese))

## (上接第 110 页)

- [12] Sanin F D, Vesilinen P A. Effect of centrifugation on the removal of extracellular polymers and physical properties of activated sludge[J]. Water Science Technology, 1994, 30(8): 117-127.
- [13] 宋相国, 张盼月, 张光明, 等. Fenton 氧化处理剩余污泥的作用机制[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(7): 64-67. (SONG Xiangguo, ZHANG Pan Yue, ZHANG Guangming, et al. Mechanism of municipal sludge disposal by fenton oxidation [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(7): 64-67. (in Chinese))
- [14] 高蓉菁, 夏明芳, 尹协东, 等. 臭氧氧化法处理印染废水[J]. 污染防治技术, 2003, 16(4): 68-70. (GAO Rongjing, XIA Mingfang, YIN Xiedong, et al. Treatment of printing and dyeing wastewater by ozone oxidation[J]. Pollution Control Technology, 2003, 16(4): 68-70. (in Chinese))
- [15] 何楚茵, 金辉, 淳炜, 等. 臭氧处理剩余污泥的减量化实验研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 4228-4234. (HE Chuyin, JIN Hui, BU Churhui, et al. Experimental study on performance of ozonation disintegration for excess sludge reduction [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 4228-4234. (in Chinese))
- [16] Yan S T, Zheng H, Li A, et al. Systematic analysis of biochemical performance and the microbial community of an activated sludge process using ozone treated sludge for sludge reduction[J]. Bioresource technology, 2009, 100(21): 5002-5009.
- [17] 王正. 污泥臭氧氧化影响因素及组合工艺污泥减量化效果研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. (WANG Zheng. Studied on influence factors for sludge ozonation and sludge reduction performance of combined processes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese))
- [18] 汪鲁, 强志民, 董慧峪, 等. 城市污水处理厂污泥臭氧减量技术研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 363-369. (WANG Lu, QIANG Zhiming, DONG Huiyu, et al. Sludge reduction by ozone in municipal wastewater treatment plants[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 363-369. (in Chinese))
- [19] 王海燕, 鲁智礼, 庞朝辉, 等. 原位臭氧氧化污泥减量化工艺的运行效能[J]. 环境工程学报, 2012(3): 779-786. (WANG Haiyan, LU Zhili, PANG Chaohui, et al. Performance of in situ ozonation sludge reduction process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012(3): 779-786. (in Chinese))
- [20] Bunning G, Hempel D C. Vital Fluorochromization of microorganisms using 3, 6-diacetylfluorescein to determine damages of cell membranes and loss of metabolic activity by ozonation [J]. Ozone Science Engineering, 1996, 18: 173-181.