

文章编号:2095-7386(2016)02-0067-05

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2016.02.012

不同密实度下黏性土的渗透性分析

陈宗先,何翔,熊云山,王锐

(武汉轻工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430023)

摘要:土体是具有复杂物理性能的材料,土体的微观孔隙特征决定了土体宏观的渗透性,从而决定了土体的物理性质。对土体渗透性能与孔隙特征进行分析,采用变水头渗透试验。取武汉某工地的黏土来制备土体试样,测量其物理指标,进行风干过筛,采用静压试验制备重塑试样,用于渗透试验。分析结果表明:随着黏性土孔隙比 e 逐渐增大即土的干密度 ρ_d 逐渐减小,则渗透系数 k 也逐渐增大,并研究对比了渗透系数与孔隙比之间的多种经验关系。

关键词:渗透系数;孔隙比;渗透试验;重塑试样

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Cohesive soils' s permeability analysis under different compactness

CHEN Zong-xian, HE Xiang, XIONG Yun-shan, WANG Rui

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: Soil mass is a material with complex physical properties, and the microscopic pore characteristics of the soil determine the permeability of the soil. So the physical properties of soil are determined. The permeability and porosity of soil are analyzed in this paper, using variable head permeability test. Main research task: the soil sample was prepared from a Wuhan site, to measure its physical index, for dry sieving, and to prepare remodeling sample by static pressure test, for penetration testing. Analysis results show that: With the increasing of the clay pore ratio e and dry density of soil gradually decreasing, the permeability coefficient K increases gradually. And the various experience relationship between permeability coefficient and void ratio are compared.

Key words: permeability coefficient; void ratio; penetration test; remodeling sample

1 引言

土是一种松软堆积物,内部空间孔隙相互连通,土中水能透过土体发生渗流,土的渗透性是一个较复杂的研究课题,不少学者对其进行了研究,目前主要采用渗透试验和固结反演等方法确定土的渗透系数。对同一土样,渗透系数与固结压力或者孔隙比

相关关系已有很多讨论^[1]。孔隙比是表征土体孔径分布的宏观指标,是土体的应力状态、屈服状态、扰动状态等的最终反映,因此对渗透系数与孔隙比关系进行探讨并取得了相对统一的结论,分析有条件下饱和黏性土渗透特性的变化规律^[2]。

为了研究黏性土的渗透性,进一步明确渗透系数与孔隙比相关关系,笔者对黏性土进行渗透试验。

收稿日期:2015-12-02. 修回日期:2015-12-24.

作者简介:陈宗先(1990-),男,硕士研究生,E-mail: 1007447368@qq.com.

通信作者:何翔(1974-),男,副教授,E-mail: hexiangchn@163.com.

所进行的变水头渗透试验步骤为:(1)取自基坑底部的土体,测量土体物理性质指标并风干过筛,试验前制备了黏性土的重塑试样 1 组共 5 个。(2)将制备的重塑试样进行变水头渗透试验,对其结果进行渗透性数据分析,分析并探索渗透系数与其孔隙比的变化规律,研究试样的渗透性。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试样取自武汉某工地深度为 9 m 基坑坑底处,将采集的土样进行风干,过 2 mm 的筛子筛选,测量其物理性质指标和物理特性。测得的土体含水率为 ω_0 ,经过计算称量一定量的土体与蒸馏水,按《土工试验技术手册》要求,制备含水率为 15% 的重塑土,将其密封静置 24 h,复测含水率,最后含水率确定为 15.13%^[3]。

将试样制备成密度 ρ_d 分别为 1.35 g/cm³, 1.4 g/cm³, 1.45 g/cm³, 1.5 g/cm³, 1.6 g/cm³ 五个等级,经计算之后再称取一定量的试样,制成 1 组 5 个平行试样,含水率确定为 15.13%,用于渗透性试验。黏性土试样物理性质指标如表 1 所示。

表 1 试样土体的物理性质指标

埋深 /m	天然密度 /(g/cm ³)	相对密度	天然含 水率/%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
9	2.03	2.75	21.9	38.95	20.43	18.52

2.2 试验方法

2.2.1 试验原理

温度效应对黏性土的力学性能有一定影响,对于不同温度下的渗透试验,在一定温度范围内随着温度升高,土样渗透性呈线性增长;温度变化对黏性土液塑限和黏性土吸附结合水量都有影响^[4]。因此,为了更好地进行变水头渗透试验,本试验的水温应控制在一定范围之内。本次渗透试验,试验水温经测定维持在 7—9 ℃ 之间。

渗透系数 k 是反映土的渗透性强弱的指标,是渗流计算的重要参数,试验采用变水头法量测黏性土的渗透系数,水头在试验过程中是动态变化的^[5]。运用渗透仪进行不同干密度下饱和黏性土的渗透分析,推出不同干密度下试样土体的渗透系数。试验装置如图 1 所示。

由图 1 可知,取细玻璃管的内截面截面积为 a ,试验试样的截面面积为 A ,试验过程中某一时刻 t 所对应的水头为 h ,时间间隔 dt 的水位差为 dh ,则在 t

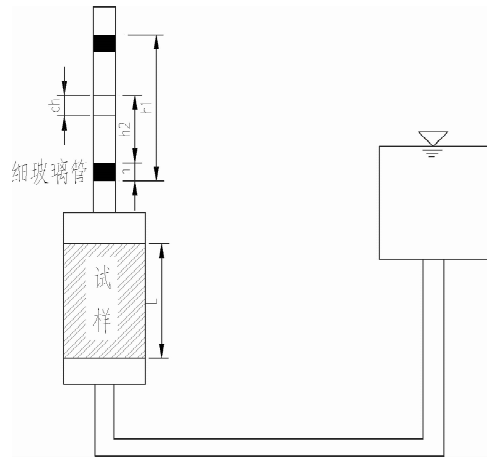


图 1 试验装置

至 $t + dt$ 的时间,流经细管土样的水量 dQ :

$$dQ = -adh. \quad (1)$$

式 1 中的负号代表渗流过程中水量随水位 h 的变小而增大。

由达西定律及水力梯度 i ,水量 dQ 又可以写

$$成: dQ = kiAdt = k \frac{h}{L} Adt. \quad (2)$$

同一时间内,经过同一截面积的总水量相等:

$$dt = - \frac{aLdh}{kAh}. \quad (3)$$

式 3 两边积分,积分后可得到:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = - \int_{h_1}^{h_2} \frac{aLdh}{kAh}. \quad (4)$$

即可得到土的渗透系数

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}. \quad (5)$$

改为常对数表示,则可写成:

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2}. \quad (6)$$

已知 a 、 L 、 A ,量测特定时刻 t_1 、 t_2 对应水位 h_1 、 h_2 即可求得渗透系数^[6]。

制样时进行三次分层填土,使用液压千斤顶,用静压试验法。取一定质量试样(含水率测得为 15.13%)制备五组平行试样,将制备的试样抽真空饱和,抽气持续 4 h,放水中 24 h,饱和度到 95% 后取出。

土的物理性质指标已知,则黏性土试样孔隙比 e :

$$e = \frac{V_v}{V_s}. \quad (7)$$

换算式:

$$e = \frac{d_s \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{d_s (1 + w) \rho_w}{\rho} - 1. \quad (8)$$

式中,土粒相对密度 d_s ; ρ 为土的天然密度, g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度, g/cm^3 ; ρ_d 为土的干密度, g/cm^3 ; e_0 为初始孔隙比。

黏性土试样基本物理性质指标见表 1,由式 8 可得初始孔隙比 e_0 :

$$e_0 = \frac{d_s (1 + \omega) \rho_w}{\rho} - 1 = 0.6514. \quad (9)$$

而重塑试样土体的干密度 ρ_d 分别为 $1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$, $1.40 \text{ g}/\text{cm}^3$, $1.45 \text{ g}/\text{cm}^3$, $1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$, $1.60 \text{ g}/\text{cm}^3$, 试样土体的孔隙率 n :

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% = \frac{e}{1 + e} \times 100\%. \quad (10)$$

求得的 5 组试样的孔隙比和孔隙率如表 2 所示。

表 2 土体试样编号及其物理指标

试样编号	干密度 $\rho_d/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	孔隙率 $n/\%$
1	1.35	1.037 0	50.91
2	1.40	0.964 3	49.09
3	1.45	0.896 6	47.27
4	1.50	0.833 3	45.45
5	1.60	0.718 8	41.82

本试验使用的五组试样,其变水管的截面积经测量分别是: 0.526 cm^2 , 0.491 cm^2 , 0.497 cm^2 , 0.503 cm^2 , 0.517 cm^2 。

2.2.2 实验操作步骤

(1)切取试样。切取试样应尽量获取原状土。使黏土试样的上下面整平击实,在环刀内壁涂一层凡士林,慢慢地垂直下压,保持环刀和试样紧密贴合。

(2)使试样与刀刃相接的黏性土试样直径大于环刀的内径,将环刀放进渗透容器前涂层凡士林在容器内壁,装止水垫圈以及将螺母旋紧,将装有试样容器的供、进水的装置连通。关闭止水夹,直到水从排气孔流出,倒放容器,打开排气管管夹,再打开止

水夹与进水夹,空气会排出,直到没有气泡排除为止。

(3)往变水头管中注水,等到了预期的高度后,把进水管夹打开,起始时间 t_1 和终止时间 t_2 ,所对应的起始水头 h_1 和终止水头 h_2 ,记录出口的开始和终止水温。

3 试验结果与讨论

根据上述试验基本原理、操作步骤,并结合本节将要介绍的计算公式和温度校正系数,得到饱和黏性土的渗透系数 k 。

(1) T °C 的渗透系数公式:

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{At} \lg\left(\frac{h_1}{h_2}\right). \quad (11)$$

其中, a 为测压管截面积; L 为试样高度,即为渗径; h_1 为开始水头; h_2 为终止水头。

(2)水温 20 °C 时的渗透系数:

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}}. \quad (12)$$

其中, k_T 、 k_{20} 分别为 T °C、20 °C 水温时的渗透系数 (cm/s); η_T 、 η_{20} 分别为 T °C、20 °C 的动力黏滞系数 ($10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$)。

渗透系数 k 与水的重度 γ_w 及黏滞度 η 有关,不同水温时, γ_w 相差不多, η 变化比较大。水温越高, η 越低, k 与 η 呈线性关系。温度 T 下测得的 k_T 值应加温度修正,成为标准温度下渗透系数值。

确定能使度量正确、测量仪器和校正仪器都具有正确指示的温度。所以,水温因素的影响不容忽视。在本试验中,特别需要注意的是水头差应大于 10 cm。针对本次渗透试验,试验水温经测定维持在 7—9 °C 之间。规范中规定采用 10 °C 或 20 °C 水温的渗透系数为试验中标准渗透系数^[7]。渗透试验中水的渗透力作用会使试样的干密度产生变化,会致使最后的结果误差变大。水的动力黏滞系数 η 、黏滞系数比 η_T/η_{20} 、温度校正系数 T_p 如表 3 所示。

表 3 水的动力黏滞系数 η 、黏滞系数比 η_T/η_{20} 、温度校正系数 T_p

温度/°C	动力黏滞系数 $\eta/10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_p	温度/°C	动力黏滞系数 $\eta/10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$	η_T/η_{20}	温度校正系数 T_p
7.0	1.428	1.414	1.25	9.0	1.347	1.334	1.32
7.5	1.407	1.393	1.27	9.5	1.328	1.315	1.34
8.0	1.387	1.373	1.28	10	1.310	1.297	1.36
8.5	1.367	1.353	1.30	12	1.239	1.227	1.44
9.0	1.347	1.334	1.32	12.5	1.223	1.211	1.46

求得的 5 个黏性土试样的渗透系数如表 4 所示。

由现有数据绘制孔隙比 e 以及黏土试样干密度 ρ_d 分别与渗透系数 k 的关系图,如图 2 和图 3 所示。

表 4 黏性土试样的渗透系数

试样 编号	温度 /℃	K_f 的平均值 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	修正 系数	最终值 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
1	9.0	5.510×10^{-5}	1.344	7.350×10^{-5}
2	9.0	2.740×10^{-5}	1.344	3.655×10^{-5}
3	7.0	2.366×10^{-5}	1.414	3.346×10^{-5}
4	7.5	1.730×10^{-5}	1.393	2.409×10^{-5}
5	7.0	1.324×10^{-6}	1.414	1.872×10^{-6}

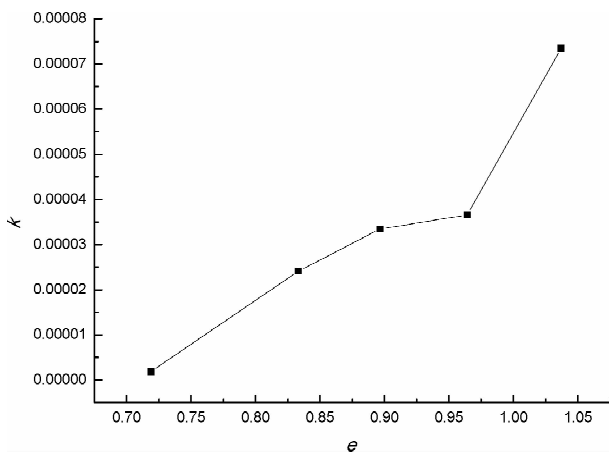


图 2 试样孔隙比 e 与渗透系数 k 的关系曲线

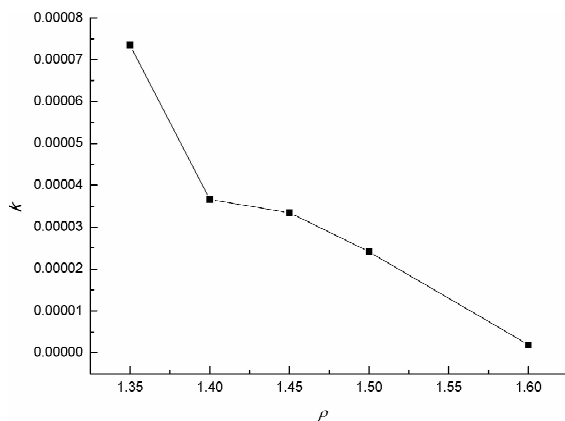


图 3 试样干密度 ρ_d 与渗透系数 k 的关系曲线

从图 2 可知,渗透系数 k 随着孔隙比 e 的增大而增大,主要分为 3 个区域:当孔隙比 e 为 0.718 8—0.833 3 区域的试样,起初孔隙孔径较小,但其孔隙率慢慢变大,孔隙孔径也逐渐增大;当孔隙比 e 为 0.833 3—0.964 3 时,土体孔隙比进一步增大,但是渗透系数增加不多;当孔隙比为 0.964 3—1.037 0 区域的试样,土体密实度最小,孔隙孔径最大,水在渗透过程中受到的颗粒间阻力是最小的,所以渗透

系数是最大的。

从图 3 可知,渗透系数 k 随着黏土试样干密度 ρ_d 的增大而减小,主要分为 3 个区域:当干密度在 1.35—1.40 时,干密度逐渐增加,土体孔隙孔径由最大逐渐减小,同样渗透系数也是逐渐减小;当干密度在 1.40—1.50 时,干密度逐渐增加,但渗透系数变化不大;当干密度在 1.50—1.60 时,干密度增加到最大,土体孔隙孔径是最小的,渗透系数是最小的。

对重塑黏性土试样进行变水头渗透试验,进行黏土试样的渗透系数 k 与孔隙比 e 和土体干密度 ρ_d 的关系分析^[8]。曾玲玲,洪振舜在对重塑黏性土的压缩过程中,对渗透系数的变化规律进行研究,发现随着重塑黏性土干密度 ρ_d 的增大和孔隙比 e 的减小,渗透系数 k 呈现指数级减小,可以通过 $e-\lg k$ 、 $\lg e-\lg k$ 以及 $\lg(1+e)-\lg k$ 的单对数或双对数形式,特别研究渗透系数与孔隙比的关系,提出考虑不同重塑土基本物理指标的影响表达式,从而建立简单实用的关于渗透系数与孔隙比关系的预测公式^[9]。研究本次变水头渗透试验的关系,通过已知 e 和 k ,得出对应的 $\lg e$ 、 $\lg(1+e)$ 、 $\lg k$ 值,对数形式如表 5 所示。

表 5 $e-\lg k$ 、 $\lg e-\lg k$ 以及 $\lg(1+e)-\lg k$ 对数形式表

编号	孔隙率 e	$\lg e$	$\lg(1+e)$	$\lg k$	渗透系数 / $10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
1	1.037 0	0.015 8	0.309 0	-4.133 7	7.350
2	0.964 3	-0.015 8	0.293 2	-4.437 1	3.655
3	0.896 6	-0.047 4	0.278 0	-4.475 5	3.346
4	0.833 3	-0.079 2	0.263 2	-4.618 2	2.409
5	0.718 8	-0.143 4	0.235 2	-5.727 7	1.872

根据表中数据得出试样的 $e-\lg k$ 、 $\lg e-\lg k$ 以及 $\lg(1+e)-\lg k$ 的单对数或双对数关系曲线图,如图 4—图 6 所示。

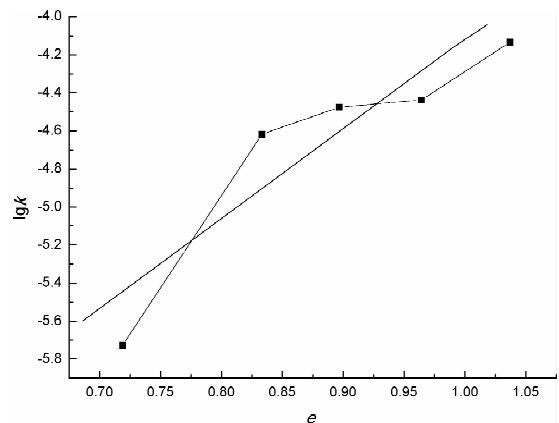


图 4 不同干密度的试样 $\lg k-e$ 的半对数关系图

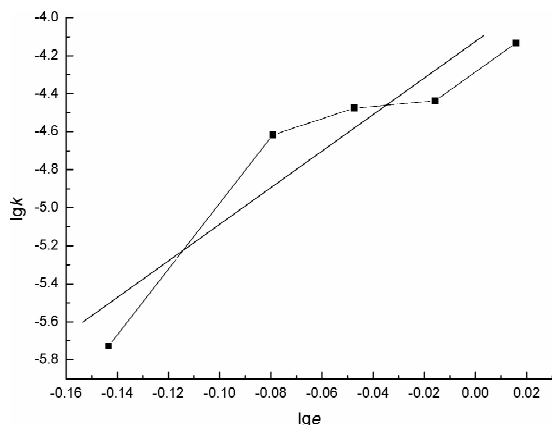


图5 不同干密度的试样 $\lg k - \lg e$ 的双对数关系

由图4可知,孔隙比 e 与 $\lg k$ 呈直线关系,其斜率为孔隙比 e 的函数,这一经验关系式位于数据点的中间,总体上具有很好的相关性,利用 origin 绘图软件对孔隙比 e 与 $\lg k$ 的坐标关系曲线进行拟合,拟合的曲线关系式:

$$y = -8.78671 + 4.61604x. \quad (13)$$

其线性相关系数 R 为 0.920 65, y 是对渗透系数 k 取的对数,即 $\lg k$, x 是试样土体的孔隙比 e 。

由图5可知, $\lg e$ 与 $\lg k$ 呈直线关系,其斜率为孔隙比 $\lg e$ 的函数,这一经验关系式位于数据点的中间,总体上具有很好的相关性,对 $\lg e$ 与 $\lg k$ 的坐标关系曲线进行拟合,拟合的曲线关系式:

$$y = -4.17139 + 9.38975x. \quad (14)$$

其线性相关系数 R 为 0.938 81, y 是对渗透系数 k 取的对数,即 $\lg k$, x 是对试样土体的孔隙比 e 取的对数,即 $\lg e$ 。不同干密度试样 $\lg k - \lg(1+e)$ 的双对数关系如图6所示。

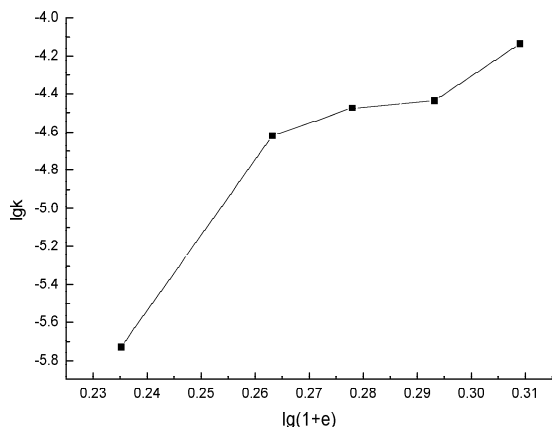


图6 不同干密度试样 $\lg k - \lg(1+e)$ 的双对数关系图

由图6可知, $\lg(1+e)$ 与 $\lg k$ 的呈直线关系,其斜率为孔隙比 $\lg(1+e)$ 的函数,这一经验关系式位

于数据点的中间,总体上具有很好的相关性,对 $\lg(1+e)$ 与 $\lg k$ 的坐标关系曲线进行拟合,拟合的曲线关系式:

$$y = -10.21286 + 20.07259x. \quad (15)$$

其线性相关系数 R 为 0.929 33, y 是对渗透系数 k 取的对数,即 $\lg k$, x 是对 $(1+e)$ 取的对数,即 $\lg(1+e)$ 。

结果表明,几种关系式反映了渗透系数与孔隙比呈直线关系,以对数形式表示的 $\lg k - \lg(1+e)$ 和 $\lg k - \lg e$ 的双对数形式得到的相关性系数,要高于半对数形式 $\lg k - e$ 所得到的相关性系数。并且线性相关性的大小顺序为 $\lg k - \lg e > \lg k - \lg(1+e) > \lg k - e$ 。关系曲线位于数据点的中间,总体上具有很好的相关性,说明 $\lg k - \lg e$ 所得到的拟合曲线关系(14)对试样的渗透系数与孔隙比关系的描述最好。

4 结束语

笔者采用变水头法试验对黏性土试样进行渗透系数的测量。由曲线知:随着黏性土孔隙比 e 逐渐增大即土的干密度 ρ_d 逐渐减小,则渗透系数 k 也逐渐增大。得出渗透系数 k 与孔隙比 e 的3种关于 $\lg k - \lg e$ 、 $\lg k - \lg(1+e)$ 、 $\lg k - e$ 半对数或双对数关系曲线图以及对应的关系式,渗透系数与孔隙比呈直线关系,通过对比分析知道 $\lg k - \lg e$ 的线性相关性最显著。本试验只研究了土体孔隙比与其渗透系数之间的关系,但孔隙比并不能完全反映土体孔隙结构的情况,所以试验研究中还要考虑土体其它参数,如液限、土体的含水比等对其渗透系数的影响。本文中许多关系曲线在拟合时为了研究与运算的方便,笔者只是做了简单的线性拟合,并没有考虑比较复杂的折线与非线性拟合^[10]。

参考文献:

- [1] 张力霆,齐清兰,魏静,等.淤填黏土固结过程中孔隙比的变化规律[J].岩土力学,2009,30(10).
- [2] 李广信.对与基坑工程有关的一些规范的讨论(3)[J].工程勘察,2013(11):1-4.
- [3] 土工试验技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [4] 唐朝生,施斌,刘春,等.黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J].岩土工程学报,2007,29(5):743-749.

(下转第108页)

- 40.
- [2] 黄庆德,黄凤洪,李文林. 菜籽脱皮加工技术实践与应用[J]. 中国油脂,2003,2(91):24-26.
- [3] 刘运荣,胡健华,黎丽. 油菜籽皮中各成分含量的测定[J]. 中国油脂,2006,31(9):64-65.
- [4] 缪淑华,梁守仁. 油菜籽粕为主要蛋白源制备水产生态营养型配合饲料技术[J]. 饲料与畜牧,2007(12):36-37.
- [5] 潘臣虎. 油菜的综合利用[N]. 湖北科技报,2003-07-14.

(上接第 71 页)

- [5] 符二东. 变水头法测定渗透系数试验方法分析及探讨[J]. 山西建筑,2014,40(2):68-69.
- [6] 刘松玉. 土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [7] 李聪,吴建林,陈琬. 纳米蒙脱土对软黏土性能影响的试验[J]. 武汉轻工大学学报,2014,33(2):72-76.
- [8] 包孟碟,何翔. 基于砂岩 CT 图像的渗透系数数值模拟研究[J]. 江西建材,2015(13):1-2.
- [9] 曾玲玲,洪振舜,陈福全. 压缩过程中重塑黏土渗透系数的变化规律[J]. 岩土力学,2012,33(5):1286-1292.
- [10] 黄发兴,陆海军,陈威,等. 饱和—非饱和填埋场衬垫系统中水渗流规律的数值模拟[J]. 武汉工业学院学报,2013,32(4):69-73.

(上接第 105 页)

作,提高农村劳动力的知识结构和技能水平,使得在城镇化进程中转移的农村劳动力能够较好适应现代服务业的要求,从而提高服务业增加值所占比重。

参考文献:

- [1] 王美霞,樊秀峰. 陕西服务业发展与城市化进程的互动关系研究[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2012,41(1):150-158.
- [2] 崔宏桥,沈颂东. 吉林省城镇化与服务业协调发展问题研究[J]. 经济纵横,2014,20(1):112-115.
- [3] 郭进,徐盈之. 城镇化扭曲与服务业滞后:机理与实证研究[J]. 财贸研究,2015,41(12):118-128.
- [4] 刘德军,商蔚. 城镇化与服务业互动发展的动态计量分析及对策建议[J]. 湖南社会科学,2015,28(4):128-131.
- [5] 李静,刘英基. 城镇化进程中的服务业就业吸纳能力的实证分析——以山东省为例[J]. 湖北社会科学,2011(10):85-88.
- [6] 王春国,冯丹. 基于面板数据的中国西部地区城镇化、工业化与服务业发展的实证研究[J]. 甘肃联合大学学报(社会科学版),2013,29(1):41-45.
- [7] 孔杰. 服务业对城镇化进程的影响分析——以淄博市为例[J]. 山东行政学院学报,2012(5):89-91.
- [8] 王向. 城市化进程与服务业发展的动态互动关系研究——来自上海的经验(1949-2010)[J]. 上海经济研究,2013(3):125-134.
- [9] 李程骅,郑琼洁. 城市化进程与服务业发展的动态关系探讨——基于江苏省域的样本检验[J]. 南京社会科学,2012(2):20-25,33.
- [10] 龚新蜀,胡志高. 服务业发展、城镇化与就业[J]. 软科学,2015,29(11):45-49.
- [11] 潘省初. 计量经济学中级教程[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [12] 易丹辉. 数据分析与 Eviews 应用[M]. 北京:中国人民大学出版社,2008.