

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 2-0424-07

# 荆门弱膨胀土的胀缩与渗透特性试验研究

周葆春<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 郭爱国<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 信阳师范学院 土木工程学院, 河南 信阳 464000)

**摘 要:** 以荆门弱膨胀土为研究对象, 开展了完整的胀缩与渗透特性试验, 获得了 5 种不同压实度下膨胀土及其石灰改良土的胀缩与渗透特征。结果表明: 膨胀土的膨胀力-干密度关系可用幂函数表达, 而无荷膨胀率、有荷膨胀率、体缩率与干密度均非单调关系; 由于压实与膨胀效应的耦合作用, 95% 压实度下膨胀土的无荷膨胀率、有荷膨胀率和体缩率均较小, 若直接利用膨胀土进行路基与地基填筑, 该压实度下土样不仅具备较大的刚度与强度且胀缩变形较小。经石灰改性后, 膨胀力与湿胀变形基本消除, 干缩变形大幅降低, 胀缩总率仅为 0.7%。膨胀土与石灰土渗透系数均很小, 且都随干密度的增大而降低, 其与干密度的关系仍可用幂函数描述; 石灰土的渗透系数大于相应压实度下的膨胀土; 而当二者干密度相近时, 渗透系数接近。

**关 键 词:** 膨胀土; 胀缩特性; 渗透特性; 压实度; 干密度

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

## Experimental study of characteristics of swelling-shrinkage and permeability for Jingmen weak expansive soil

ZHOU Bao-chun<sup>1,2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, GUO Ai-guo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

**Abstract:** A series of tests for characteristics of swelling-shrinkage and permeability are carried out on Jingmen weak expansive soil under five different compactnesses and on the lime-treated soil. The test results show that the swelling pressure - dry density relation can be represented by a power function; while the relations between non-loaded swelling ratio, linear swelling ratio, volume shrinkage ratio and dry density are all non-monotonous. The expansive soil with the compactness of 95 % has the lower swelling ratio and volumetric shrinkage ratio, which is due to effects of coupled compaction and swelling. Therefore, the compactness should be selected as 95 % in weak expansive soil embankment construction. On the other hand, the lime treatment can reduce swelling and shrinkage of expansive soil, indicating by the fact that the swelling-shrinkage total ratio of the lime-treated expansive soil is only 0.7 %. In addition, the permeability coefficient of the lime-treated and untreated expansive soil all decrease with increasing dry density. This relation can be represented by the power function as well. The permeability coefficient of the lime-treated soil is larger than that of the untreated expansive soil under the same compactness; however, for the approximate dry density, the difference of the permeability coefficient between the two types of soil is not large.

**Key words:** expansive soil; swelling-shrinkage characteristics; permeability characteristics; degree of compaction; dry density

### 1 引 言

膨胀土遇水膨胀软化崩解, 失水收缩干裂, 是典型的灾害性土, 中国是膨胀土分布最为广泛的国家之一, 膨胀土地区的道路与铁道工程、轻型结构基础工程、岸坡与渠道工程均无法回避。对于量大

面广的弱膨胀土分布区域而言, 出于经济上的考虑, 常直接利用弱膨胀土进行路基与地基填筑, 因此, 对其强度、变形、胀缩与渗透等力学特性的研究成为弱膨胀土地区工程建设的关键环节。

目前对弱膨胀土及其石灰改良土的力学与工程性质已有相当认识<sup>[1-6]</sup>。文献[6]系统探讨了荆门压实

收稿日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51009118); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20100470058); 河南省基础与前沿技术研究计划项目 (No. 082300410180); 河南省教育厅自然科学基金研究计划项目 (No. 2008B560012)。

第一作者简介: 周葆春, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事土体力学性质与本构模型方面的研究工作。E-mail: zhoubcxynu@163.com

弱膨胀土及其石灰改良土（石灰土）的变形与强度特性，本文在此基础上以该膨胀土为研究对象，开展了相对完整的胀缩与渗透特性试验，获得了5种不同控制压实度下膨胀土及其石灰改良土的胀缩与渗透特征，并探讨其随干密度的演化规律，以期提供荆门弱膨胀土完整的力学特性描述，为弱膨胀土地地区的路基与地基填筑工程实践提供参考。

## 2 试验方案

### 2.1 试验土样

试验用土取自湖北荆门，为弱膨胀土，呈黄褐色、硬塑状态，含黑色铁锰结核，局部有白色填充物，其物理性质指标成见表 1，矿物成分与颗粒组见表 2；重型击实试验表明，该膨胀土的最优含水率为 15.5%，最大干密度为 1.86 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 试验用土的物理性质参数<sup>[6]</sup>  
Table 1 Physical properties of the tested soil<sup>[6]</sup>

天然含水率 /%	天然密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	土粒相对密度	天然干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	液限 /%	塑限 /%	自由膨胀率 /%
21.1~22.3	2.03	2.72	1.68	42.1	20.9	42

表 2 矿物成分与颗粒组成<sup>[6]</sup>  
Table 2 Mineral compositions and particle component<sup>[6]</sup>

矿物组成 /%				颗粒组成 /%			
伊利石	蒙-伊混层	高岭石	石英	>0.075 mm	0.075~0.005 mm	2~5 μm	<2 μm
35	5	40	20	13.2	57.3	14.5	15.0

为探讨不同压实度下膨胀土的胀缩与渗透特性，其控制压实度分别为100%、95%、90%、85%、80%，根据文献[2]的建议，压实膨胀土控制含水率稍高于最优含水率，取17%。此外，为探讨石灰改良后的胀缩与渗透特性，采用掺灰比为3%的石灰土进行平行试验，该石灰土重型击实试验的最优含水率为19%，最大干密度为1.71 g/cm<sup>3</sup>[6]，试样制备的控制压实度为95%，根据文献[5]的建议，石灰土控制含水率稍高于最优含水率，取21%。膨胀土与石灰土样均采用压样法制备，制样控制指标见表3。

表 3 制样控制指标  
Table 3 Controlling indices of sample preparation

土样类型	控制压实度 /%	控制干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	控制含水率 /%
膨胀土	100	1.86	17
	95	1.77	17
	90	1.67	17
	85	1.58	17
	80	1.49	17
石灰土	95	1.62	21

膨胀力试验、膨胀率试验、收缩试验、固结试验采用直径为61.8 mm、高度为20 mm的环刀试样；变水头渗透试验采用直径为61.8 mm、高度为40 mm的环刀试样。试样制备过程为：首先测定风干含水率，根据控制含水率计算加水量，每次取过2 mm筛的风干土5 kg，平铺在不吸水的盘内，用喷雾器喷洒预计的水量，静置30 min，装入密封袋中，置于保湿缸内湿润24 h；根据控制干密度计算各土样所需湿土质量，将相应质量的湿土倒入预先装好环刀的压样器内，拂平土样表面，以静压力将土压入环刀内。石灰土样根据质量百分比在风干土样中掺入3%的消石灰粉末再加相应水量的方法制备；制备完成后，参照行业标准文献[7]的标准养生方法，养生28 d后备用。各土样制备完成后，用游标卡尺量测土样高度（量测4次，取均值）以获得制样后的体积。文中将制备好的膨胀土试样和经养生后的石灰土试样称为制样含水率试样。文中试验方法与数据处理参照行业标准文献[8]执行。

### 2.2 胀缩特性试验

为明确压实度对弱膨胀土胀缩特性的影响，首先开展5种压实度下的膨胀土与压实度为95%的石灰土试样的胀缩特性试验，包括以下内容。

#### 2.2.1 膨胀力试验

膨胀力是土体吸水膨胀时产生的最大内应力。试验采用制样含水率试样，采用平衡法（试验过程中维持试样体积不变）在杠杆式固结仪上完成，试样的稳定标准为隔6 h百分表读数不变。

#### 2.2.2 膨胀率试验

根据加载条件分为无荷与有荷膨胀率试验。无荷膨胀率试验中，膨胀率定义为侧限和无荷载条件下浸水后的单向膨胀增量与试样原始高度的百分比。有荷膨胀率试验施加的荷载为50 kPa，此时的膨胀率定义为试样在侧限和50 kPa压力下浸水后的单向膨胀增量（浸水膨胀稳定后与压密稳定后试样高度的差值）与试样原始高度的百分比。试验均采用制样含水率试样在杠杆式固结仪上完成，试样的稳定标准为隔24 h百分表读数不变。

#### 2.2.3 收缩试验

收缩试验目的是测定土的收缩特性指标，包括线缩率、体缩率与收缩系数。为探讨完全饱和和后膨胀土与石灰土的收缩特性，将制样含水率试样置入固结容器中浸水饱和至体积不变后再置入收缩仪内进行试验。此外，为探讨初始含水率状态下膨胀土的收缩特性，还需用制样含水率试样直接进行收缩试验。因此，收缩试验分为两组；第1组为饱和土样，

包括5种控制压实度的膨胀土和控制压实度为95%的石灰土；第2组为非饱和土样，包括控制压实度分别为100%、95%、90%的膨胀土。试样的稳定标准为隔24 h百分表读数不变。

### 2.3 渗透特性试验

#### 2.3.1 变水头渗透试验

将5种压实度下的制样含水率膨胀土试样分别置于变水头渗透装置中进行渗透试验，待出水管口有水溢出后，连续测读水头和相应时间6次以上。

#### 2.3.2 固结试验

为探讨石灰土的渗透特性，先对制样含水率试样进行真空抽气饱和，然后在杠杆式高压固结仪上进行试验，压力等级为25、50、100、200、400、800、1 600、3 200 kPa。每级压力下的固结时间为24 h，每级压力下按时间顺序测记量表读数以求取固结系数，用于推算石灰土在各级固结压力下的渗透系数。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 胀缩特性试验结果及其分析

#### 3.1.1 膨胀力

膨胀力试验历时24 h，结果见表4与图1。表4中的干密度、压实度、试验前含水率为制样完成后的指标，由于制样误差，与制样控制指标有较小差异（文中以下部分的情况类似）。由表4可见，该膨胀土经石灰改性后，膨胀力基本消除。由图1可以看出，对于膨胀土，其膨胀力 $p_e$ 与干密度 $\rho_d$ 的关系可用幂函数的形式来表达，

$$p_e = 4.03\rho_d^{7.76}, R^2 = 0.977 \quad (1)$$

表4 膨胀力试验结果

Table 4 Results of swelling pressure tests

土样类型	干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	压实度 / %	试验前含水率 / %	试验后含水率 / %	膨胀力 / kPa
膨胀土	1.855	99.7	16.6	17.2	468.4
	1.760	94.6	16.9	20.1	355.9
	1.700	91.4	16.9	22.1	262.5
	1.577	84.8	17.6	26.7	122.9
	1.484	79.8	17.4	30.6	59.8
石灰土	1.647	96.3	20.8	24.0	3.3

#### 3.1.2 无荷膨胀率

无荷膨胀率试验历时96 h，试验结果见表5，可见膨胀土均发生较大的湿胀变形，而石灰土的膨胀率仅为0.3%。

图2为 $t$ 时刻的无荷膨胀率 $\delta_t$ 与时间 $t$ 的关系曲线，可见压实度越小的膨胀土，在初始阶段的膨胀

增速愈大，也愈快达到稳定状态。压实度居中的土样膨胀率最大；压实度为95.8%的土样膨胀率要小于压实度为98.1%、91.5%、89.1%的土样。

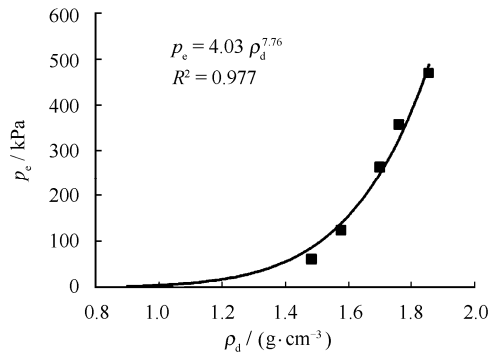


图1 膨胀土膨胀力-干密度关系

Fig.1 Swelling pressure - dry density relationship

表5 无荷膨胀率试验结果

Table 5 Results of non-loaded swelling ratio tests

土样类型	初始干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	压实度 / %	试验前含水率 / %	试验后含水率 / %	试验后干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	膨胀率 / %
膨胀土	1.824	98.1	16.8	28.1	1.542	18.3
	1.781	95.8	16.6	28.4	1.536	16.0
	1.701	91.5	17.4	32.6	1.441	18.1
	1.657	89.1	16.2	35.2	1.390	19.2
	1.547	83.2	17.4	35.4	1.385	11.7
石灰土	1.653	96.6	19.8	23.9	1.647	0.3

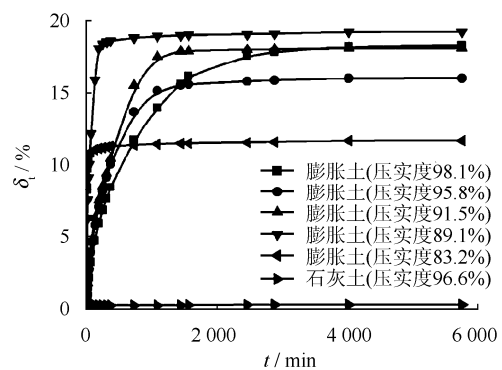


图2 膨胀率-时间关系（无荷膨胀率试验）

Fig.2 Swelling ratio - time relationships

本文认为该现象产生的原因是压实效应与膨胀效应的相互作用，相对于压实度为95.8%的土样，压实度为98.1%的土样膨胀率较大是其初始干密度较大，导致其膨胀效应较大，这一点可由上节膨胀力的试验结果印证；而压实度为91.5%、89.1%的土样膨胀率较大的原因是其压实效应相对较弱。

在此认为，压实度分别为98.1%与95.8%、89.1%与83.2%的土样试验后干密度接近也是由压实与膨

胀效应的耦合作用造成的。

### 3.1.3 有荷膨胀率

50 kPa压力下的膨胀率试验历时82 h(浸水膨胀阶段)，试验结果见表6。由表5与表6中膨胀土膨胀率的对比可见，压力对膨胀土湿胀变形有显著的抑制作用。石灰土的有荷膨胀率仅为0.1%。

表6 有荷膨胀率试验结果

Table 6 Results of linear swelling ratio tests

土样类型	初始干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	压实度 / %	试验前含水率 / %	试验后含水率 / %	试验后干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	膨胀率 / %
膨胀土	1.839	98.9	16.7	22.5	1.688	10.5
	1.786	96.0	16.8	23.8	1.651	9.3
	1.721	92.5	17.1	26.0	1.594	9.5
	1.641	88.2	16.5	27.8	1.549	7.0
	1.562	84.0	17.2	28.2	1.539	2.6
石灰土	1.685	98.5	20.5	22.3	1.694	0.1

图3为t时刻的有荷膨胀率 δ<sub>e50</sub> 与时间t的关系曲线，可见与压实度分别为98.9%、92.5%的土样相比，压实度为96.0%的土样具有更低的有荷膨胀率。

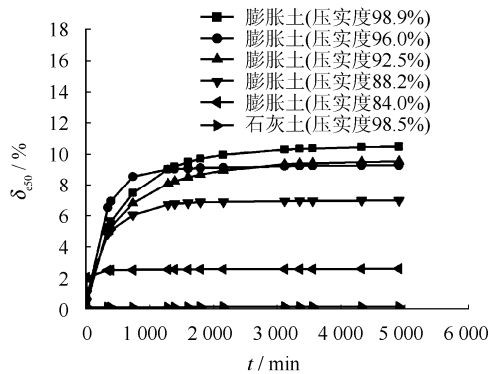


图3 膨胀率-时间关系(有荷膨胀率试验)

Fig.3 Swelling ratio - time relationships

综合表5、6与图2、3看，对于膨胀土，无论无荷膨胀率还是有荷膨胀率与初始干密度均为非单调函数关系，控制压实度为95%左右土样的无荷膨胀率与有荷膨胀率均相对较低，这是压实与膨胀效应的耦合作用所致。

### 3.1.4 收缩特性

收缩试验历时32 d。竖向线缩率 δ<sub>si</sub> 与w的关系见图4，可见饱和与非饱和膨胀土的干缩过程分3个阶段：① 体积收缩与w降低成正比的阶段(线性段)；② 随w的继续减小土体收缩速率放缓的阶段(非线性段)；③ w继续降低而土体不再收缩的阶段(水平段)。饱和膨胀土的3阶段较为明显，在含水率高于19%的部分，5种饱和膨胀土均处于线性段；

非饱和膨胀土的线性段较短。饱和石灰土则直接由线性段进入水平段，非线性段不明显。从最终竖向线缩率来看，饱和土样中压实度为93.1%与非饱和土样中压实度为95.5%的膨胀土最终竖向线缩率相对较小。

取各土样线性段的斜率获得收缩系数 λ<sub>s</sub> 见表7。图5为饱和膨胀土的收缩系数-初始干密度关系的拟合结果，表明该关系可用式(2)的幂函数形式来描述。而非饱和膨胀土的收缩系数与初始干密度并非单调关系，压实度为95.5%的非饱和膨胀土收缩系数相对较低。

$$\lambda_s = 0.13\rho_d^{4.51}, R^2 = 0.917 \quad (2)$$

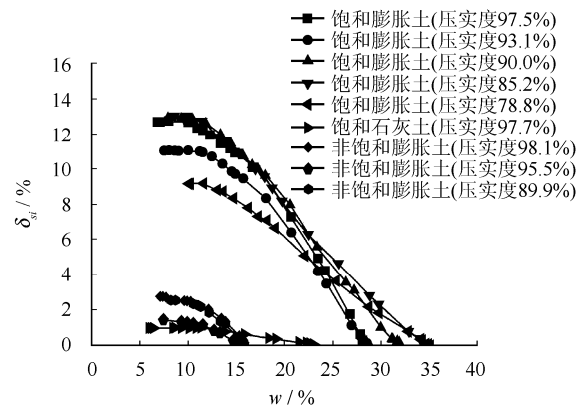


图4 竖向线缩率-含水率关系曲线

Fig.4 Vertical shrinkage ratio-water content relationships

表7 收缩试验结果

Table 7 Results of shrinkage tests

土样类型	制样后干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	压实度 / %	试验开始时干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	试验结束后干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	收缩系数	体缩率 / %
饱和膨胀土	1.814	97.5	1.526	1.994	0.91	23.48
	1.732	93.1	1.509	1.939	0.79	22.17
	1.674	90.0	1.421	1.929	0.67	27.72
	1.584	85.2	1.347	1.850	0.56	28.69
	1.466	78.8	1.335	1.698	0.41	21.73
饱和石灰土	1.671	97.7	1.659	1.701	0.08	2.75
非饱和膨胀土	1.825	98.1	1.825	1.996	0.57	9.72
	1.777	95.5	1.777	1.890	0.30	7.20
	1.671	89.9	1.671	1.844	0.51	11.61

从表7中给出的体缩率来看，无论初始状态是饱和还是非饱和，体缩率与干密度也非单调关系，压实度在95%附近的膨胀土体缩率相对较小。

此外，对比饱和与非饱和膨胀土试验结束后的干密度，发现历经湿干循环的饱和膨胀土试样收缩完成后的最终体积要小于未经湿干循环的非饱和膨胀土收缩完成后的体积。也就是说，经历湿干循环

后，膨胀土会收缩到一个更小的体积。

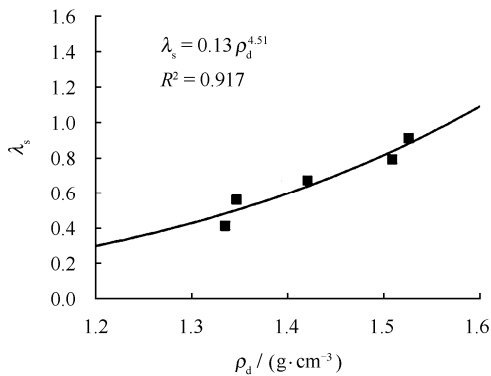


图5 饱和膨胀土收缩系数-干密度关系  
Fig.5 Shrinkage coefficient - dry density relationship

而石灰土的试验结果表明，经石灰改性后，膨胀土的干缩变形大幅降低。

### 3.1.5 胀缩总率

胀缩总率  $e_{ps}$  是膨胀土胀缩特性的总体反映，一般用式 (3) 来表达<sup>[9-10]</sup>，

$$e_{ps} = \delta_{e50} + \lambda_s (w - w_m) \quad (3)$$

式中： $w$  为土的天然含水率； $w_m$  为收缩过程中可能产生的含水率下限值，这里按 8% 来考虑 ( $w - w_m$ )。获得各土样的胀缩总率见表 8。

表 8 胀缩总率  
Table 8 Swelling-shrinkage total ratios

土样类型	土样状态	控制压实度 /%	胀缩总率 /%
膨胀土	饱和	100	17.8
		95	15.6
		90	14.9
		85	11.5
		80	5.9
石灰土	饱和	95	0.7
		100	15.1
膨胀土	非饱和	95	11.7
		90	13.6

由表 8 可见，对于未经历完整湿干循环的非饱和膨胀土而言，95% 的控制压实度对应的胀缩总率最小。而经过石灰改良的土样经历湿干循环后的胀缩总率仅为 0.7%。

对经历了 1 次湿干循环的饱和膨胀土而言，95% 的控制压实度对应的胀缩总率稍高于控制压实度为 90% 的膨胀土。其原因是式 (3) 中采用收缩过程中线性段的  $\lambda_s$ ，虽然控制压实度 95% 的膨胀土收缩过程中线性段的  $\lambda_s$  大于控制压实度 90% 的膨胀土；但由图 4 和表 7 可见控制压实度 95% 的膨胀

土实际上具有更低的体缩率。因此，可认为控制压实度 95% 的饱和膨胀土具有较低的胀缩总率。

综合这 5 种不同控制压实度下膨胀土及其石灰改良土的胀缩特征，对于弱膨胀土地区的路基与地基填筑工程给出的建议是，从降低胀缩变形的角度而言，首选石灰改良，若出于经济考量直接利用膨胀土填筑，压实度控制在 95% 左右不仅具有较大的刚度与强度<sup>[6]</sup>，而且胀缩变形较小。

## 3.2 渗透特性试验结果及其分析

### 3.2.1 膨胀土渗透特性

变水头渗透试验历时 53 d，结果见表 9。可见膨胀土渗透系数  $k$  很小，量级为  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  cm/s，且随干密度的增大而降低，图 6 的拟合结果表明用式 (4) 的幂函数形式来表达  $k - \rho_d$  关系，相关系数在 0.92 以上，拟合效果较好。

$$k = 2.249 \times 10^{-6} \rho_d^{-11.387}, R^2 = 0.922 \quad (4)$$

表 9 变水头渗透试验结果

Table 9 Results of variable head permeability tests

土样类型	干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	压实度 /%	渗透系数 / (10 <sup>-9</sup> cm/s)
膨胀土	1.843	99.1	3.70
	1.764	94.8	5.42
	1.685	90.6	6.45
	1.599	85.9	7.50
	1.505	80.9	22.40

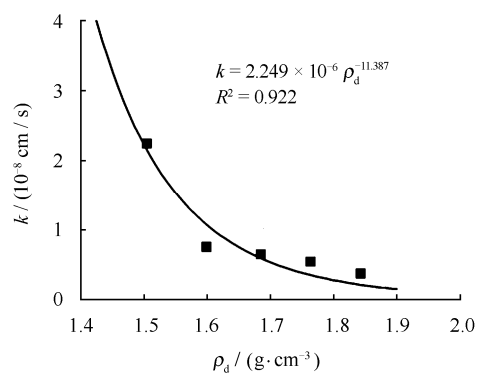


图 6 膨胀土渗透系数-干密度关系  
Fig.6 Permeability coefficient - dry density relationship

综合膨胀土的胀缩与渗透特征，膨胀力、渗透系数与干密度均为单调关系，可用幂函数描述；而无荷膨胀率、有荷膨胀率、体缩率与初始干密度均非单调函数关系。

究其原因，不同压实度下膨胀力试验与变水头渗透试验均采用恒体积法，试验过程中体积不变、干密度恒定，仅存在膨胀效应，膨胀变形受约束表现为膨胀力，而制样过程中形成的压实效应无从体

现,所以膨胀力、渗透系数与干密度均为单调关系。在胀缩变形试验过程中,体积随吸湿、脱湿过程发生变化,压实与膨胀、收缩效应存在耦合作用,因此,其无荷膨胀率、有荷膨胀率、体缩率与初始干密度均非单调函数关系。

### 3.2.2 石灰土渗透特性

控制压实度为 95% 的饱和石灰土固结试验历时 8 d, 结果见表 10。由式 (5) 可推算出饱和石灰土在各级固结压力下的渗透系数。

$$k = C_v m_v \gamma_w \quad (5)$$

式中:  $C_v$  为固结系数;  $m_v$  为体积压缩系数;  $\gamma_w$  为水的重度。

由表 10 可见,石灰土的渗透系数较小,且随固结压力的增大(干密度的增大)而减小,当固结压力为 25 kPa 时,干密度为 1.648 g/cm<sup>3</sup>, 相应渗透系数为 1.75×10<sup>-7</sup> cm/s; 而当固结压力增大到 3 200 kPa 时,干密度为 1.736 g/cm<sup>3</sup>, 相应渗透系数为 5.87×10<sup>-9</sup> cm/s。

表 10 固结试验结果  
Table 10 Results of consolidation test

固结压力 /kPa	孔隙比	干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	体积压缩系数 / (MPa <sup>-1</sup> )	固结系数 / (cm <sup>2</sup> /s)	渗透系数 / (10 <sup>-9</sup> cm/s)
0	0.659	1.640			
25	0.650	1.648	0.214 0	0.008 2	175.00
50	0.642	1.657	0.192 0	0.001 3	25.00
100	0.629	1.670	0.162 0	0.001 1	17.00
200	0.620	1.679	0.050 0	0.003 6	18.20
400	0.614	1.685	0.019 0	0.007 6	14.50
800	0.604	1.696	0.015 1	0.007 9	11.90
1 600	0.590	1.711	0.010 9	0.008 6	9.45
3 200	0.567	1.736	0.008 6	0.006 8	5.87

通过变水头渗透试验测得压实度为 94.8% (试验过程中干密度维持为 1.764 g/cm<sup>3</sup>) 的膨胀土渗透系数为 5.42×10<sup>-9</sup> cm/s, 表明控制压实度为 95% 时,石灰土渗透系数大于膨胀土; 这是由于 95% 压实度下石灰土的干密度 (1.64 g/cm<sup>3</sup> 左右) 低于相应膨胀土 (1.76 g/cm<sup>3</sup> 左右)。若在相近干密度条件下, 如上述干密度为 1.736 g/cm<sup>3</sup> 的石灰土与干密度为 1.764 g/cm<sup>3</sup> 的膨胀土, 二者的渗透系数相近 (5.87×10<sup>-9</sup> cm/s 与 5.42×10<sup>-9</sup> cm/s)。

## 4 结 论

(1) 对膨胀土而言,其膨胀力与干密度的关系可用幂函数的形式来表达。无荷膨胀率、有荷膨胀率、体缩率与初始干密度均非单调函数关系。控制压实度为 95% 左右土样的无荷与有荷膨胀率均相对

较低,这是压实与膨胀效应的耦合作用所致。无论初始状态是饱和还是非饱和,压实度在 95% 附近的膨胀土体缩率均相对较小。

(2) 经石灰改性和标准养护 28 d 后,弱膨胀土的膨胀力与湿胀变形基本消除,干缩变形大幅降低,胀缩总率仅为 0.7%。

(3) 从降低胀缩变形的角度而言,宜首选石灰改良,若出于经济考虑直接利用膨胀土填筑路基与地基,压实度控制在 95% 左右不仅具有较大的刚度与强度,而且胀缩变形较小。

(4) 膨胀土渗透系数很小,量级为 10<sup>-8</sup> ~ 10<sup>-9</sup> cm/s,且随干密度的增大而降低,可用幂函数的形式来表达  $k$ - $\rho_d$  关系。石灰土的渗透系数较小,也随干密度的增大而降低,但大于相应压实度下膨胀土的渗透系数;然而干密度相近时,两类土的渗透系数接近。

**致谢:** 感谢中国科学院武汉岩土力学研究所陈碧君、鲁莉芳工程师在试验方面给予的帮助。感谢香港理工大学土木及结构工程系 Research Associate 胡亮博士对本文的修改意见。

## 参 考 文 献

- [1] 孔令伟,郭爱国,赵颖文,等. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732.  
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability and its mechanical effect of Jingmen expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 727—732.
- [2] 孔令伟,郭爱国,陈善雄,等. 膨胀土的承载强度特征与机制[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 54—60.  
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shan-xiong, et al. Characteristics and mechanism of bearing strength of expansive soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(11): 54—60.
- [3] 郭爱国,孔令伟,胡明鉴,等. 膨胀土路堤处治效果原位试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1263—1268.  
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian, et al. On the in-situ test of effect for the disposal of expansive soil embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1263—1268.
- [4] 陈善雄,李伏保,孔令伟. 弱膨胀土工程特性及其路基处治对策[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 353—359.  
CHEN Shan-xiong, LI Fu-bao, KONG Ling-wei.

- construction process of underground powerhouse with explicit finite difference method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.2) : 3760—3767.
- [6] 姜繁智, 向晓东, 朱东升. 国内外岩爆预测的研究现状与发展趋势[J]. **工业安全与环保**, 2003, 29(8): 19—22.  
JIANG Fan-zhi, XIANG Xiao-dong, ZHU Dong-sheng. The current status and developing tendency of rock blasting forecast at home and abroad[J]. **Industrial Safety and Dust Control**, 2003, 29(8): 19—22.
- [7] 邱道宏, 陈剑平, 肖云华, 等. 分离式隧道非同步开挖岩爆预测研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(2): 515—520.  
QIU Dao-hong, CHEN Jian-ping, XIAO Yun-hua, et al. Study of rockburst prediction of separated tunnel excavated asynchronously[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 515—520.
- [8] 徐林生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. **岩土力学**, 2002, 23(3): 300—303.  
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Yong-lin. Study of mechanism and judgment of rockbursts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 300—303.
- [9] 刘建华, 朱维申, 李术才. 岩土介质三维快速拉格朗日数值分析方法研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(4): 525—529.  
LIU Jian-hua, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai. Study of fast Lagrangian numerical analysis method for rock and soil medium in 3 dimensions [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 525—529.
- [10] 李仲奎, 戴荣, 姜逸明. FLAC3D 分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(增刊 2): 2387—2392.  
LI Zhong-kui, DAI Rong, JIANG Yi-ming. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC3D and application in huge underground cavern group[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.2): 2387—2392.
- [11] 柴贺军, 刘浩吾, 王明华. 大型电站坝区应力场三维弹塑性有限元模拟与拟合[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(9): 1314—1318.  
CHAI He-jun, LIU Hao-wu, WANG Ming-hua. Stress field simulation and fitting by 3D elasticity FEM for large hydropower project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(9): 1314—1318.
- [12] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性和施工过程力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [13] 朱维申, 周奎, 余大军, 等. 脆性裂隙围岩的损伤力学分析及现场监测研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(10): 1963—1969.  
ZHU Wei-shen, ZHOU Kui, YU Da-jun, et al. Study of field monitoring and damage mechanics analysis of brittle fractured rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 1963—1969.

#### 上接第 429 页

- Engineering behaviors of weak expansive soil and its treatment measures for roadbed filling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 353—359.
- [5] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰改性膨胀土施工最佳含水率确定方法探讨[J]. **岩土力学**, 2007, 28(3): 517—521.  
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian, et al. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 517—521.
- [6] 孔令伟, 周葆春, 白颢, 等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(10): 3036—3042.  
KONG Ling-wei, ZHOU Bao-chun, BAI Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3036—3042.
- [7] 交通部公路科学研究院. JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [8] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [9] 李庆鸿. 新建时速 200 公里铁路改良膨胀土路基施工技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [10] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.