

## 重塑膨胀土膨胀力室内试验研究

卢子威<sup>1,2</sup>, 张文慧<sup>1,2</sup>, 王晶晶<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098; 2. 河海大学 堤坝与岩土工程重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 为了进一步研究膨胀土膨胀力的发展规律, 采用平衡加荷法研究南京膨胀土竖向膨胀力随时间、初始含水率、干密度的变化规律。试验结果表明: 膨胀土试样初始含水率越小、干密度越大, 膨胀速率越快; 同一干密度的膨胀土试样随着含水率的增加, 膨胀力不断下降, 膨胀土试样的膨胀力与含水率基本呈线性关系; 同一含水率的膨胀土试样的膨胀力随干密度的增大而增大, 膨胀土试样的膨胀力与干密度基本呈幂指函数关系。

**关键词:** 膨胀土; 含水率; 干密度; 膨胀力

**中图分类号:** TU41

**文献标识码:** A

## Experimental study of the swelling force of remolded expansive soils

LU Zi-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-hui<sup>1,2</sup>, WANG Jing-jing<sup>1,2</sup>

(1. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Key laboratory of Geo-mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** expansive soil; moisture content; dry density; swelling pressure In order to further study of the law development of expansive soil expansion force, load balance method is used to study the Nanjing expansive soil vertical expansion force changing with time, initial moisture content, and dry density. The results show that the smaller the initial moisture content of expansive soil sample, the bigger the dry density is, the faster the expansion rate is; Expansion force decreases with the increase of initial water absorption, The expansion force and water content of expansive soil samples are linear. The expansive force increases with the increase of dry density, and there is exponential function between expansion force and dry density of expansive soil sample.

**Key words:** expansive soil; moisture content; dry density; swelling pressure

膨胀土吸水膨胀、失水收缩, 反复胀缩变形导致强度衰减的特性, 对路基、轻型建筑、机场、边坡、堤坝等都有严重的破坏作用, 对于建筑物的变形破坏作用往往具有长期潜在危险的特点<sup>[1]</sup>。当膨胀趋势受阻时, 会以力的形式表现出来, 国内外对膨胀力的变化规律研究已经取得一定的成果: 高英等<sup>[2]</sup>对膨胀力的影响因素进行了分析研究, 发现影响膨胀力的最主要因素是液限, 主要因素是含水量与干密度, 次要因素是黏粒含量与胶粒含量; 丁振洲等<sup>[3]</sup>深入剖析膨胀力的概念, 通过膨胀力试验, 研究探讨了膨胀土的膨胀力与初始含水率、干密度的关系, 大量试验结果表明膨胀力与初始含水率呈线性负相关, 膨胀力与初始干密度

呈指数相关的变化规律; 谢云等<sup>[4]</sup>对膨胀土进行三向膨胀力试验, 结果表明: 三向膨胀力不等, 水平膨胀力小于竖向膨胀力, 微小的位移可以使膨胀力大大降低, 膨胀力与位移呈对数关系, 并给出了膨胀力与初始含水率和干密度的关系式; 罗冲等<sup>[5]</sup>在不同约束状态下进行膨胀力与膨胀率试验, 发现不同的约束压力下膨胀土膨胀性有显著影响, 约束压力越大, 膨胀性越小, 膨胀力越大。

为进一步了解膨胀土竖向膨胀力特征, 本文采用平衡加荷法, 就含水率和干密度两个因素对竖向膨胀力的影响开展试验, 以得到竖向膨胀力和时间的关系, 以及不同初始含水率、干密度的重塑膨胀土竖向膨胀力的变化规律。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土样

本文试验所用的膨胀土样取自江苏省茌申县东坝段胥河南岸某工地,取样深度为原地面以下1.0~1.5 m之间的膨胀土区域。土样取回后立即取一部分土进行含水率、密度等基本物理性质试验。试验方法按《土工试验方法标准》<sup>[6]</sup>执行,试验结果见表1。

由表1和《土的工程分类标准》<sup>[7]</sup>可知,该土样为高液限黏土。根据《膨胀土地区建筑技术规范》<sup>[8]</sup>,该土样属于弱膨胀土。

### 1.2 试验方案

试验所用膨胀土均为室内制备的重塑土样。首先将膨胀土放置于通风干燥处风干,碾散后过2 mm筛,测量土样的风干含水率;按照试验设计所需的初始含水率值计算应加入的水量,然后向过

筛后的土样中分别喷洒相应量的水后拌合均匀,装入塑料袋中,密封24 h使土样的含水率均匀;然后测定土样的含水率,保证2个以上的不同位置处的含水率的差值不超过1%;最后称取准确质量的土样,采用静力压样法制备试样,制备不同干密度不同含水率的试样,试样的质量误差控制在 $\pm 2$  g,试样的高度为2.0 cm,直径为6.18 cm。

试验采用杠杆式固结仪,试验前对仪器变形量进行校正,装好试样后自上而下向仪器内注入纯水,当百分表开始顺时针转动,说明试样开始膨胀,立即添加适当荷载,使百分表指针回到初始位置。在试验开始阶段,土的膨胀变形较为明显,测试读数的时间间隔小于1 h,当试样2 h的变形量小于0.01 mm时认为膨胀稳定。

## 2 试验结果以及分析

### 2.1 竖向膨胀力随时间变化关系

土样竖向膨胀力与时间的关系如图1,从图中

表1 土样基本物理性质指标

Tab.1 The basic property index of soil sample

含水率 /%	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重 $G_s$	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	塑性指数 $I_p$	粘粒含量 /%	自由膨胀率 $F_s$ /%
19.8	1.91	2.74	59.7	22.5	37	72.08	58

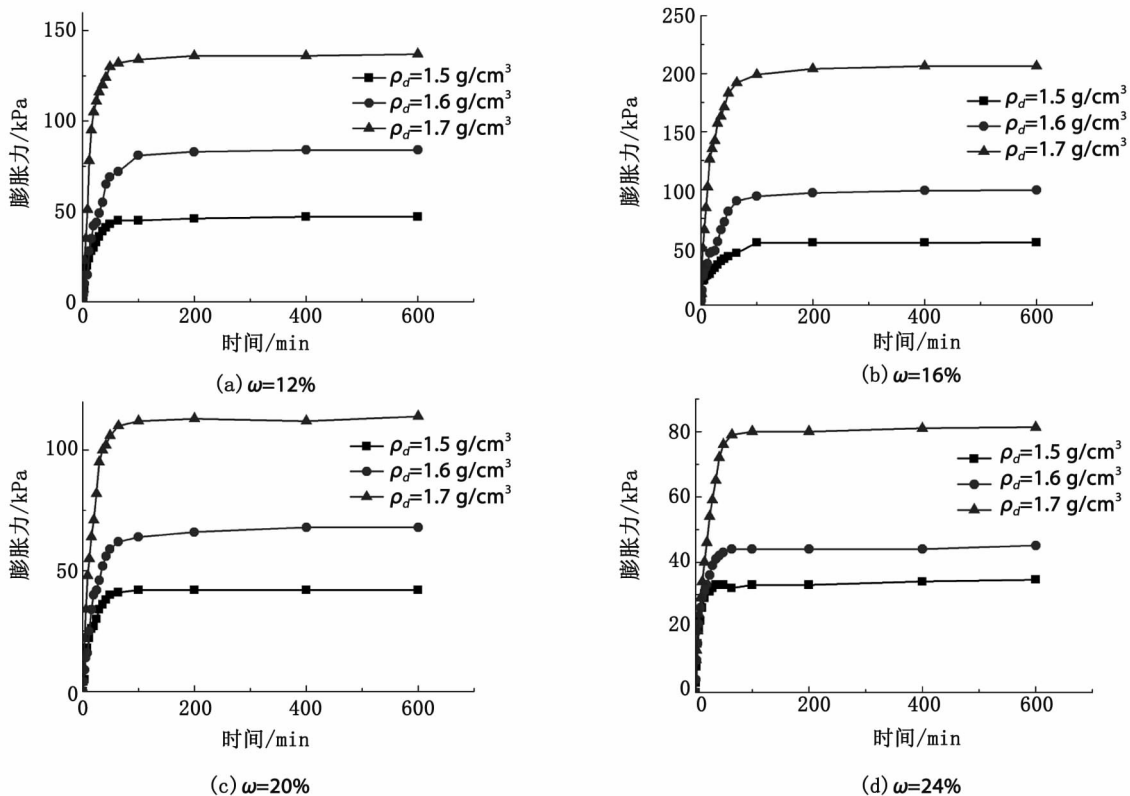


图1 膨胀力与时间关系图

Fig.1 Swelling pressure-time curve

可以看出,随着时间的增长,土样的膨胀力越来越大,2~3 h后膨胀力基本达到稳定。膨胀力与时间的关系图与膨胀时程曲线相似,可以划分为3个阶段:①加速膨胀阶段,0~1 h;②等速膨胀阶段,1~3 h;③稳定阶段,3 h以后。试验开始浸水时,土样在强烈的亲水性作用下吸水膨胀表现得十分显著,土样的膨胀势急剧增大,而土样的侧限条件使得膨胀势无法释放,转化为膨胀力,此阶段膨胀力与时间呈线性关系;随着水分的快速侵入,土体内部结构也随之发生相应的重组,膨胀势和膨胀力增长速度变慢;稳定阶段,膨胀土的膨胀势已消耗殆尽,土体内部空隙已基本被水分充满,膨胀力不再变化。

从图1还可以看出,膨胀速度快慢还与初始含水率、干密度相关,初始含水率越低,初始干密度越大,膨胀速度越快。含水率较低的试样内部存在较多孔隙,当水分快速浸入,土体内部结构也随着发生相应的重组,吸水膨胀作用较为明显;干密度较大说明试样内部孔隙较小,土样浸水后,土颗粒的膨胀空间受到限制,从而形成较大的推力。同一含水率的试样干密度越大,膨胀速度越快;在干密度为 $1.7 \text{ g/cm}^3$ 时,膨胀力增大特别明显。

## 2.2 膨胀力与初始含水率关系

本试验共配制了初始含水率分别为12.0%、16.0%、20.0% (天然含水率)、24.0%,干密度分别为 $1.50$ 、 $1.60$ 、 $1.70 \text{ g/cm}^3$ 的4组膨胀土试样,每组均有4个平行试样,在恒温恒湿的条件下采用平衡加荷法进行膨胀力试验。图2为干密度分别为 $1.50$ 、 $1.60$ 、 $1.70 \text{ g/cm}^3$ 膨胀土试样膨胀力随含水率变化曲线。

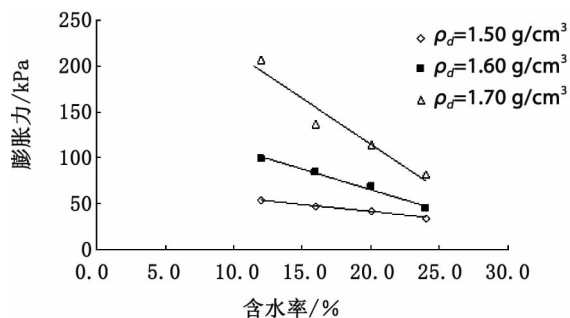


图2 膨胀力与初始含水率的关系

Fig.2 The relationships between swelling

由图2可以看出,同一干密度的膨胀土试样随着含水率的增加,膨胀力不断下降,初始含水率越大,膨胀力越小。同一干密度下不同含水率对

试样膨胀力产生上述规律性影响,主要原因是膨胀土中含有大量亲水性的蒙脱石,蒙脱石的存在使得膨胀土具有较大的膨胀潜势,当按照试验设计的某一特定的含水率配制试样时,因加入了一定量的水,土体中的膨胀性矿物蒙脱石遇水膨胀,因此会消耗、发挥掉一部分的膨胀势能。当试样再经历浸水膨胀的试验过程时,变形稳定之后的总膨胀变形为试样剩余的膨胀能量的发挥,约束其剩余的膨胀能量的发挥产生膨胀变形所用的力即为膨胀力。对于初始含水率较大的试样,其在试样制备的过程中已消耗了较多的膨胀能,存在的膨胀潜势较小,因而试验过程里能够消耗的膨胀势能相对较小,最终的膨胀变形就越小,抑制膨胀变形所用的力即膨胀力也就越小<sup>[9]</sup>。

对膨胀力与含水率的试验结果进行回归分析,拟合关系为:

$$P = k\omega + c \quad (1)$$

其中, $P$ 为膨胀力; $\omega$ 为含水率;相关拟合参数见表2。

表2 膨胀力与含水率间的相关拟合参数  
Tab.2 Fitting parameters of the expansion force and moisture content

干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.5	1.6	1.7	
拟合参数	$k$	-1.580 8	-4.463 5	-9.961 3
	$c$	72.959	154.78	314.07
相关系数	$R^2$	0.993 0	0.986 4	0.943 8

由式(1)及表2可见,膨胀力与含水率呈线性变化。谢云等<sup>[4]</sup>利用三向胀缩仪研究了南阳陶盆重塑膨胀土的三向膨胀力规律,给出了膨胀力与干密度和初始含水量的关系,在干密度一定时,初始含水率的增大膨胀力会不断减小,与本文的试验得到的膨胀力和含水率变化趋势一致。

## 2.3 膨胀力与干密度关系

试验中对同一含水率的膨胀土样,干密度分别为 $1.50$ 、 $1.55$ 、 $1.60$ 、 $1.65$ 、 $1.70 \text{ g/cm}^3$ 膨胀土试样进行膨胀力试验,试验结果见图3。

由图3可以看出,同一含水率的膨胀土试样的膨胀力随干密度的增大而增大。当膨胀土试样的干密度较小时,不同含水率膨胀土试样的膨胀力相差不大,含水率对膨胀土膨胀力的影响较小;当膨胀土试样的干密度较大时,含水率对膨胀土膨胀力的影响较大,膨胀力随着含水率的增大而减小。同一含水率不同干密度对试样膨胀力产生

表3 膨胀力与干密度间的相关拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of expansion force and dry density

含水率 $\omega/\%$		12	16	20	24
拟合参数	$k$	0.000 7	0.009 4	0.005 7	0.025 8
	$c$	7.470 0	5.670 0	5.875 7	4.760 9
相关系数	$R^2$	0.951 3	0.985 6	0.910 1	0.909 7

上述规律性影响,主要原因为膨胀土的晶格扩张、粒间(集聚体间)双电层作用、吸力势的解除等综合作用的结果。

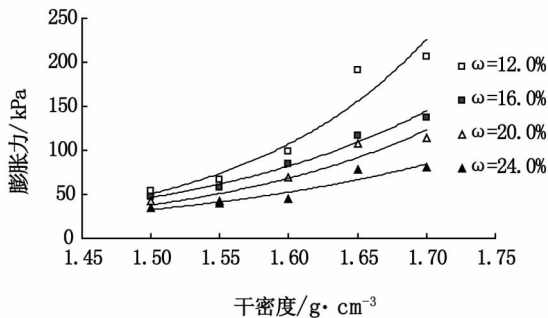


图3 膨胀力与干密度的关系

Fig.3 The relationships between swelling pressure and dry density

对膨胀力与干密度的试验结果进行回归分析,拟合关系为:

$$P = ke^{cp_d} \quad (2)$$

其中, $P$ 为膨胀力; $P_d$ 为干密度;相关拟合参数见表3。

由式(2)以及表3可见,膨胀力与干密度呈指数函数变化。

### 3 结论

1)膨胀力随着浸水时间的增长而增大,分为加速膨胀阶段、等速膨胀阶段和稳定阶段,2~3 h后膨胀力基本达到稳定。同一初始含水率的试样,初始干密度越大,膨胀速率越快;同一初始干密度的试样,初始含水率越小,膨胀速率随时间增长越明显。

2)最大膨胀力随着初始含水率的增大而不断发生变化,呈现不断减小的趋势,两者基本呈线性关系;膨胀土试样的膨胀力随干密度的增大而增大,膨胀土试样的膨胀力与干密度基本呈幂指数函数递增的发展趋势。

3)通过对膨胀土与初始含水率、干密度的试验数据分析,得到其拟合关系公式  $P = k\omega + c$  和  $P = ke^{cp_d}$ ,为膨胀土地区工程结构的稳定分析提供参考。

### 参考文献:

- [1]杨和平,曲永新,郑健龙,等.中国西部公路建设中膨胀土工程地质问题的初步研究[J].长沙交通学院学报,2003,19(1):19-24.
- [2]高英,赵廷华,司友深.膨胀力影响因素分析研究[J].人民黄河,2010,32(5):120-122.
- [3]丁振洲,郑颖人,李利晟.膨胀力变化规律试验研究[J].岩土力学,2007,28(7):1328-1332.
- [4]谢云,陈正汉,孙树国,等.重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J].岩土力学,2007,28(8):1636-1642.
- [5]罗冲,殷坤龙,周春梅,等.膨胀土在不同约束状态下的试验研究[J].岩土力学,2007,28(3):635-638.
- [6]GB/T 50123-1999,土工试验方法标准[S].
- [7]GB/T50145-2007,土的工程分类标准[S].
- [8]GBJ112-87,膨胀土地区建筑技术规范[S].
- [9]SRIDHARAN A, SREEPADA R, SIVAPULLAIAH P V. Swelling pressure of clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 1986(9):1083-1107.

(责任编辑 王利君)