

文章编号: 1000-7598-(2007) 08-1636-07

重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究

谢 云, 陈正汉, 孙树国, 李 刚, 方祥位

(后勤工程学院, 重庆 400041)

摘 要: 用三向胀缩仪对南阳陶岔重塑膨胀土做了 12 个三向膨胀力试验, 9 个湿胀干缩试验和 9 个控制变形的膨胀力试验。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; 湿胀干缩使重塑膨胀土的膨胀力降低, 第一次干湿循环后膨胀力减小最多; 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; 给出了膨胀力与初始含水率和干密度的关系式。

关 键 词: 三向胀缩仪; 膨胀土; 竖向膨胀力; 水平膨胀力; 干湿循环; 控制变形的膨胀力试验

中图分类号: TU 411.8

文献标识码: A

Test research on three-dimensional swelling pressure of remolded expansive clay

XIE Yun, CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, LI Gang, FANG Xiang-wei

(Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: A series of tests were conducted for the unsaturated expansive soil using three-dimensional swell-shrinking device. The three-dimensional swell-shrinking characteristics of remolded expansive soils was studied. According to the test results, three-dimensional swelling pressures are unequal. The lateral swelling pressure is smaller than vertical swelling pressure. The swelling pressure of remolded expansive soil is decreasing with wet-dry cycles. And a small strain could bring obvious decreasing of swelling pressure. The logarithmic relation between lateral pressure and strain is proposed. A formula of vertical swelling pressure with initial water content and dry density is given.

Key words: three-dimensional swell-shrinking device; expansive soil; vertical swelling pressure; lateral swelling pressure; swelling pressure test with deformation controlled

1 引 言

湿胀干缩是膨胀土的一个典型特征。在大气营力作用下水渗入和反复干湿循环作用, 造成了土体的膨胀与收缩, 产生的内应力使得裂隙产生和原生裂隙扩展, 形成错综复杂的裂隙网络, 使膨胀土强度降低, 造成膨胀土边坡溜坍和滑坡等病害。因此, 研究膨胀土的反复胀缩效应对渠道边坡有很大意义。刘松玉^[1]对重塑膨胀土在干湿循环下的变形特性进行了研究, 卢再华^[2]还对南阳重塑膨胀土在干湿循环过程中裂隙的演化进行了 CT 试验。国外也有学者对干湿循环引起的重塑膨胀土的液限和导水率的变化进行了研究, 发现随着干湿循环过程所用

水的 pH 值不一样, 干湿循环引起的重塑膨胀土的液限和导水率的变化趋势也不同。

膨胀土浸水膨胀, 如果这种膨胀变形受到限制必然产生膨胀力。研究膨胀土的膨胀力对研究膨胀土的变形和强度都是很有价值的。以往对膨胀土的膨胀力之研究大都局限于一维变形状态, 只能测定竖向膨胀力^[3-6]。张颖钧用三向胀缩仪研究了一些典型膨胀土的三向膨胀力, 初步探讨了垂直膨胀力和水平膨胀力之间的关系及原状膨胀土在湿胀干缩过程中循环膨胀力的变化; 黄熙龄等^[8]做了原状膨胀土三轴浸水膨胀试验, 得到了膨胀率与时间的关系; 王园^[9]用改装的三轴仪, 对不同含水率的荆门膨胀土在三向应力作用下的浸水变形特性进行了试

验研究。

路堑坡中土体遇水膨胀时，其受力状态是三维的，在产生竖向膨胀力的同时也会引起挡土墙、桩基、埋在膨胀土中的地下管道、涵洞的破坏。因此，研究膨胀土受水膨胀以后产生的侧向膨胀力对工程建筑物的稳定也是必要的。张颖钧^[10]对裂土侧向膨胀力国内外研究现状进行了评述，认为在裂土地区修建路堑挡墙时要适当考虑超固结卸荷膨胀造成的水平膨胀力。

本文通过重塑膨胀土的三向膨胀力试验、湿胀干缩试验和控制变形的膨胀力试验，对不同含水率和干密度的重塑膨胀土三向膨胀力变化规律及变形大小对膨胀力的影响进行了研究。

2 试验研究方法

2.1 三向胀缩仪

试验所用的仪器是后勤工程学院的三向胀缩仪，该仪器是在铁道部科学院西北研究院研制的三向胀缩特性仪基础上改进的，可同时量测三向的变形和力，与计算机配套自动采集数据，见图 1。



(a)



(b)

图 1 三向胀缩仪

Fig.1 The test apparatus

图 2 为三向胀缩仪的构造示意图，其设计是以平衡加压法试验原理为依据的。不同于传统的在固结仪上逐渐加荷平衡膨胀力的方法，采用薄钢板作为平衡膨胀力的测力元件。方型试验框架是仪器的核心，它可以分为顶盖，4 个方型铜柱和底座 3 个

部分。顶盖和底座为中间构成 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 通孔的铜块，顶盖和底座铜块之间由 4 根高为 4 cm 的方型铜柱联结，这样就在方型试验框架中心部位构成了 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的试验空间。下部铜块按 X、Y、Z 方向分别安装 3 片等强度梁作为测力元件，3 片等强度梁的相对位置上安装有 3 个百分表架。从图 2 可以看出，方型试验框架的结构和试样相对两个面上有一对承压活塞。承压活塞上钻有很多小孔，可以起到透水石的作用，直接和试样接触，以尽量消除三向胀缩仪受膨胀力后仪器本身的变形量；承压活塞通过钢珠分别和等强度梁以及试样变形调整螺杆接触，同时测出膨胀力和变形量。试样所需的变形量可以旋转调整螺杆实施，其变形量用百分表控制。方型试验框架上备有 2 个 8 mm 圆孔，可插电阻丝，根据需要烘干试样，以进行干湿循环三向膨胀力变化试验。

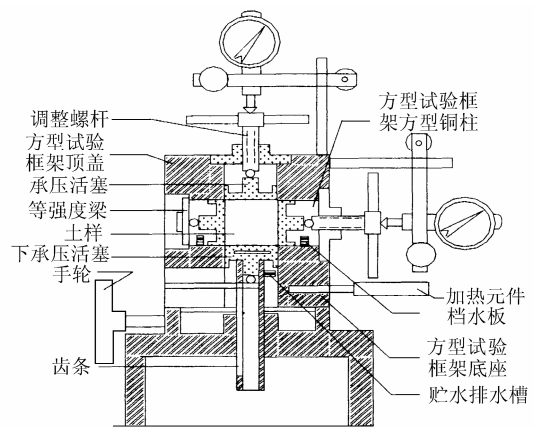


图 2 三向胀缩特性仪结构示意图

Fig.2 The sketch of test apparatus

2.2 试验方案与方法

试验用土取自南水北调中线工程陶岔引水渠道边坡，重塑制样。先按照含水率分别为 9.85%，13.32%，15.95%，17.32% 配置土样，在各含水率下的制备干密度分别为 1.5，1.6，1.7 g/cm^3 试样。试样尺寸为 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ ，将方型试样盒放入定位套筒中，再把土装入方型试样盒，用专门的加载设备将土压实后推出（图 3）。



图 3 定位套筒和方型制样盒

Fig.3 The quadratic sample case

共做了 3 类三向胀缩试验, 包括三向膨胀力试验(4 组 12 个试样)、干湿循环试验(3 组 9 个试样)、控制变形的三向膨胀力试验(3 组 9 个试样)。试验方案见表 1。

表 1 试验方案
Table 1 Test schemes

三向膨胀力试验			干湿循环试验			控制变形的三向膨胀力试验		
试样 编号	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³	试样 编号	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³	试样 编号	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³
1-1		1.5	2-1		1.5	3-1		1.5
1-2	9.85	1.6	2-2	9.85	1.6	3-2	9.85	1.6
1-3		1.7	2-3		1.7	3-3		1.7
1-4		1.5	2-4		1.5	3-4		1.5
1-5	13.32	1.6	2-5	15.95	1.6	3-5	15.95	1.6
1-6		1.7	2-6		1.7	3-6		1.7
1-7		1.5	2-7		1.5	3-7		1.5
1-8	15.95	1.6	2-8	17.32	1.6	3-8	17.32	1.6
1-9		1.7	2-9		1.7	3-9		1.7
1-10		1.5						
1-11	17.32	1.6						
1-12		1.7						

做三向膨胀力试验时, 先将试样装入仪器, 安上百分表; 再拧动调整螺杆, 施加 1 kPa 初始压力, 使试样、承压活塞、钢珠、等强度梁各部分接触; 然后在试样的顶部和底部同时加水, 等强度梁受力并按等强度梁的变形量拧动调整螺杆, 使试验过程中三个方向试样的变形量始终坚持为 0。按时记录膨胀力和添加适量水, 当膨胀力读数差每小时小于 0.01 kPa 时就属稳定, 此时的膨胀力即为试样的膨胀力。

做干湿循环试验时, 先进行三向膨胀力试验, 测得其膨胀力, 取为初始值。然后, 吸干试样周围的余水, 插上 2 根功率为 50 W 的电阻丝烘干试样。烘样 24 h 后, 去掉加热元件, 待仪器整体温度降至室温, 再次加水测得其三向膨胀力, 如此反复 3 次。

做控制变形的膨胀力试验时, 先进行三向膨胀力试验, 待试样浸水膨胀稳定后, 测得其膨胀力。然后, 调整某个水平方向, 使该方向的试样变形量达到 0.05 mm, 待三向膨胀力读数稳定后, 记下此时的膨胀力, 接着再调整该方向的百分表, 使该方向的试样变形量达到 0.10 mm, 如此反复, 直至该方向的水平膨胀力减小到 0 为止, 这样可以得到该方向的水平膨胀力和侧向变形之间的关系。

3 重塑膨胀土的三向膨胀力变化规律

3.1 竖向膨胀力随时间变化规律

表 2 为三向膨胀力试验的试样浸水后不同时刻

的竖向膨胀力实测值。从表可知, 浸水后 2~3 h 竖向膨胀力就基本上达到最大值, 这一点从图 4 所示的同一含水率的试样在不同干密度时的竖向膨胀力 P_{oz} 随时间变化曲线看得更清楚, 这种曲线特征是南阳陶盆膨胀土的矿物成份和土体结构^[6]决定的。试验初期, 随着水的浸入, 土样的膨胀势急剧增长, 由于土样的体变受到限制, 膨胀势不能释放, 便转化为膨胀力的快速增长, 膨胀力与时间呈线性关系。随后, 膨胀势和膨胀力增长速度变慢, 膨胀土的结构渐趋稳定, 几个小时后, 土样基本达到饱和, 膨胀势和膨胀力不再变化, 土的结构达到稳定状态。膨胀速度快慢还与初始含水率相关, 初始含水率低, 膨胀速度快, 可以解释为当膨胀土含水率较低时, 基质吸力可以达到很高的值, 这种吸力的作用犹如有效应力作用一样会使土发生收缩; 浸水后膨胀土中的基质吸力急剧降低, 相当于有效应力大大减小, 导致土的体积膨胀^[10]。初始基质吸力越高, 土的膨胀速度就越快。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 g/cm³ 时, 膨胀力增大特别明显。

表 2 不同时刻的竖向膨胀力
Table 2 Vertical swelling pressure at different times

试样 编号	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³	不同时刻(min) 竖向膨胀力/kPa		
			30	120	300
1-1	9.85	1.5			
1-2	9.85	1.6	150.3	148.7	151.7
1-3	9.85	1.7	229.6	400	402
1-4	13.32	1.5	60.7	76.9	81.4
1-5	13.32	1.6	76.5	100.1	116.5
1-6	13.32	1.7	210	311.9	352
1-7	15.95	1.5	56.7	68	67.6
1-8	15.95	1.6	85.3	101.7	98.1
1-9	15.95	1.7	210	276	313.2
1-10	17.32	1.5	38.9	58.5	61.9
1-11	17.32	1.6	47.8	79.9	79.1
1-12	17.32	1.7	99.7	237	256.3

3.2 竖向膨胀力与水平膨胀力关系

重塑膨胀土试样按竖直方向 oz , 水平方向 ox 水平方向 oy 放入三向胀缩仪中。在试样顶部和底部同时注水, 保持试样变形为 0 的情况下, 可以测得试样三个方向的膨胀力 P_{ox} 、 P_{oy} 、 P_{oz} 。

图 5 为含水率为 15.95 % 不同干密度在加水膨胀达到饱和后竖直膨胀力和水平膨胀力的时程曲线。竖直方向的膨胀力在加水后增长速度快于水平方向的膨胀力, 但达到稳定所需时间大致一样。表 3 为不同含水率和干密度的膨胀力测定结果, R_0 为水

平膨胀力平均值与垂直膨胀力之比。可以看出，所有的 R_0 都小于 1，说明竖向膨胀力大于水平膨胀力，二者之间的比值随着土的含水率和干密度不同，表现了土的各向异性。相同含水率时， R_0 随干密度的增大而增大，说明土被压实时各向异性特性减弱。张颖钧^[8]测得 6 种原状土样的水平方向和竖直方向的膨胀力的比值是介于 0.376~0.646 之间，水平方向膨胀力小于竖直方向膨胀力。

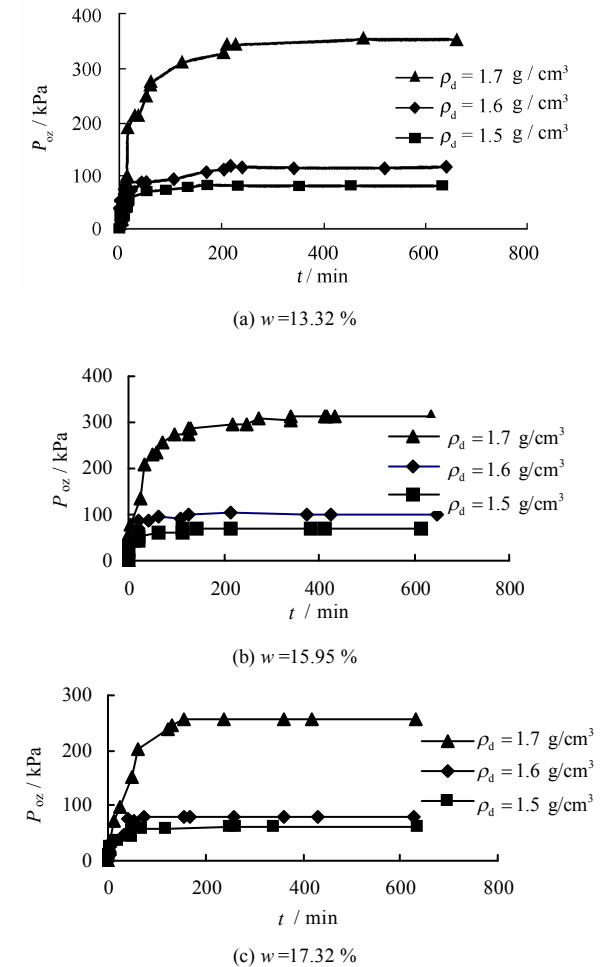


图 4 竖向膨胀力-时间曲线
Fig.4 Vertical swelling pressure-time curve

表 3 重塑膨胀土的膨胀力

Fig.3 Swelling pressure of remolded expansive soil

试样编号	含水率 / %	干密度 / g·cm ⁻³	P_{oz} / kPa	P_{ox} / kPa	P_{oy} / kPa	R_0
1-1	9.85	1.5	151.7	76.7	88.5	0.544
1-2		1.6				
1-3		1.7				
1-4	13.32	1.5	81.4	34.1	25.6	0.367
1-5		1.6	116.5	58.9	48.4	0.461
1-6		1.7	352	246.8	215.7	0.657
1-7	15.95	1.5	67.6	26.8	24.3	0.378
1-8		1.6	98.1	48.6	42.7	0.466
1-9		1.7	313.2	210.6	208.3	0.671
1-10	17.32	1.5	61.9	25	26.8	0.418
1-11		1.6	79.1	38.1	36.6	0.473
1-12		1.7	256.3	179.6	168.1	0.679

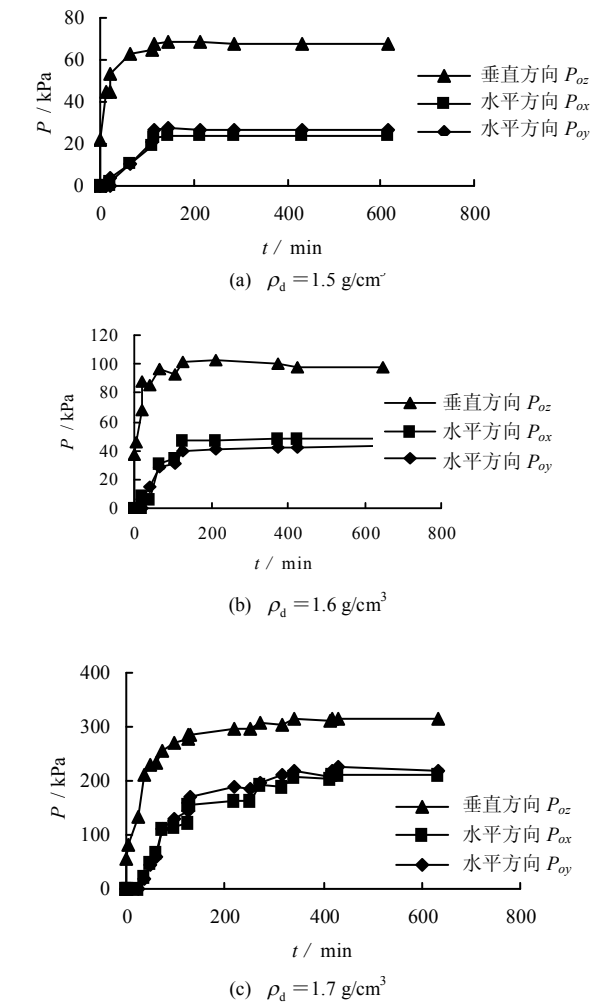


图 5 三向膨胀力-时间曲线
Fig.5 Three-dimension swelling pressures-time curves

3.3 竖向膨胀力与初始含水率关系

依据表 3 中的数据可以绘出竖向膨胀力与初始含水率的关系，在同一干密度下不同初始含水率的竖向膨胀力如图 6 所示。可以看出，同一干密度下竖向膨胀力随初始含水率增大而减小，二者之间大致呈线性关系，回归分析式见表 4。

卢肇钧等^[4]对广西膨胀土和山东钙土进行了不同含水率的抗剪强度和膨胀力试验，对试验数据进行整理和回归分析发现，膨胀力和总凝聚力均可用含水率的幂函数描述，在干密度一定时，随初始含水率增大膨胀力会减小。与本文得到的竖向膨胀力随含水率的变化趋势一致。

表 4 不同干密度土样膨胀力与初始含水率的回归关系式
Table 4 The formulas of vertical swelling pressure

干密度 / g·cm ⁻³	回归分析式
1.5	$P_{oz} = -4.9247w + 146.78$
1.6	$P_{oz} = -9.3664w + 243.48$
1.7	$P_{oz} = -18.244w + 588.02$

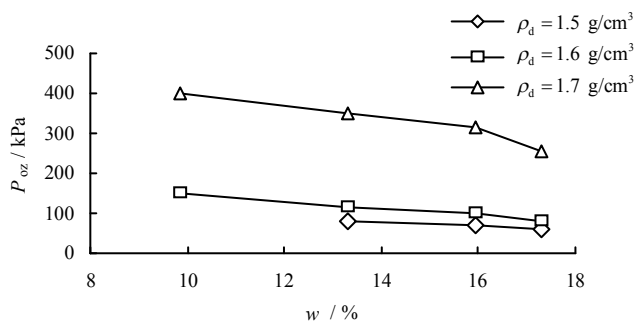


图6 竖向膨胀力与初始含水率关系

Fig.6 The relationships between vertical swelling pressure and initial water content

3.4 竖向膨胀力与干密度关系

同样依据表3的数据可以得到同一初始含水率时竖向膨胀力与干密度的关系,如图7所示,图中的曲线用指数函数为

$$P_{oz} = P_0 + Ae^{\rho_d/B} \quad (1)$$

式中 P_0 、 A 、 B 为土性参数,取值见表5。

从图7看出,同一初始含水率的土样,干密度越大,膨胀力越大。干密度为 1.7 g/cm^3 时的膨胀力比干密度为 1.5 g/cm^3 和 1.6 g/cm^3 时的膨胀力大出许多。

表5列出了 P_0 与 A 和干密度有关的参数取值。据此划出 P_0 与初始含水率和 A 的关系曲线如图8和图9所示。由图可知,随着初始含水率的增加, P_0 值和 A 值线性减小, B 为常数,因此可以得到竖向膨胀力与土样的初始含水率、干密度的关系式:

$$P_{oz} = \left[(1.47 - 5.39w) + (6.045 - 20.48w)10^{-4}e^{18.87 \frac{\rho_d}{\rho_w}} \right] p_{\text{atm}} \quad (2)$$

式中: w 为含水率, ρ_w 为水的密度; p_{atm} 为大气压。

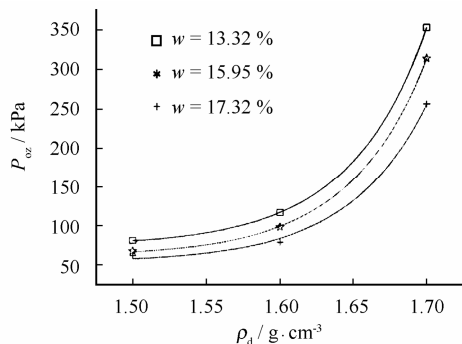
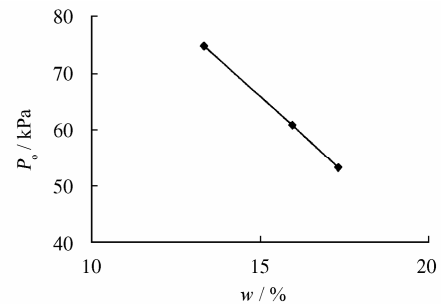
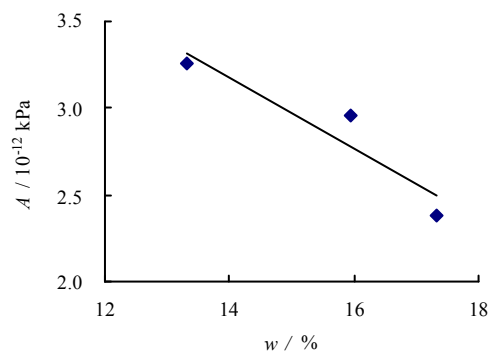


图7 竖向膨胀力与干密度的关系

Fig.7 The relationships between vertical swelling pressure and dry density

表5 与干密度有关的参数取值
Fig.5 Parameters associated with dry density

$w / \%$	P_0 / kPa	$A / 10^{-12}$	B
13.32	74.781 39	3.255 1	0.053
15.95	60.914 26	2.961 1	0.053
17.32	53.137 19	2.378 5	0.053

图8 P_0 与初始含水率的关系Fig.8 The relationship between P_0 and initial water content图9 A 与初始含水率的关系Fig.9 The relationship between A and initial water content

4 重塑膨胀土的湿胀干缩循环试验结果分析

表6为不同循环次数时测得的竖直膨胀力 P_{oz} 的大小。从试验结果可以看到,竖直膨胀力随着干湿循环次数而减小,呈递减型,减小值随着循环次数而减小。这个结论与原状土的干湿循环特性有些不同。张颖钧^[7]用三向胀缩仪对取自安康、西乡、勉西、成都狮子山、鸦雀岭、蒙自的原状膨胀土做了湿干循环试验,显示由于原状膨胀土具有较大的密度和前期固结压力,干湿循环能部分破坏土的固化凝聚力,使得湿胀干缩循环膨胀力要大于原状试样的膨胀力。

对于膨胀土而言,土的充分重塑破坏了原状土的固化凝聚力,重塑试样中只有与含水率、干密度有关的原始凝聚力,在制样器中经过单向压缩后,

黏土颗粒排列具有定向性，膨胀潜势比较大。经过干湿循环后，黏粒集聚成较大的集聚体^[11]，同时颗粒定向性逐渐丧失，每次干湿循环后土颗粒在相应的膨胀力下逐步进行调整，使调整后的结构和膨胀力相适应，使得下一次循环的膨胀力减小。

表 6 试样的垂直膨胀力
Table 6 Vetical swelling pressures

试样 编号	含水率 / %	干密度 / g·cm ⁻³	P_{oz} / kPa			
			1	2	3	4
2-1	9.85	1.5				
2-2	9.85	1.6	151.7	125.3	117.8	115.2
2-3	9.85	1.7	402	364.2	345.9	341.6
2-4	13.32	1.5	81.4	54.1	43.7	39.8
2-5	13.32	1.6	116.5	78	65.4	58.1
2-6	13.32	1.7	352	313.2	298.4	265.1
2-7	17.32	1.5	61.9	26.4	25.1	24.9
2-8	17.32	1.6	79.1	56.2	48.9	46.2
2-9	17.32	1.7	256.3	203.2	198.3	187.6

5 控制变形的膨胀力试验结果分析

在控制变形的膨胀力试验过程中，试样浸水膨胀稳定后测得最大膨胀力值，即三向位移都为 0 时膨胀力的值，如控制某一方向的位移量，则可测得不同的变形量所对应的膨胀力。

图 10 为试样干密度 ρ_d 为 1.7 g/cm³ 时不同含水率的三向膨胀力-应变曲线。可以看出，水平应变的微小变化就可引起三向膨胀力的大幅度减小。应变越小时，膨胀力减小的速率越快，例如，含水率为 9.85 % 的试样在水平应变仅达到 0.75 % 时，竖向膨胀力就从 402 kPa 降低到了 290.8 kPa。

图 11 为不同含水率和干密度的侧向膨胀力-变形关系。纵坐标用水平膨胀力的对数值 $\lg P_{ox}$ ，横坐标取侧向变形的线胀率 ε 为应变变量，即用侧向变形量除以土样的原始宽度为 4 mm 的百分比。图 11 表明，侧向应变同样可以引起水平膨胀力的减小。由这一点可以考虑，在修建膨胀土地区的地下涵洞、挡墙等建筑物时，可采取允许变形量大的柔性挡墙和其他柔性建筑物等工程措施，或者以可压缩回填料作为膨胀土挡墙缓冲层，与柔性建筑物共同作用，经济有效地减小水平膨胀力。与以往采用非膨胀性土料来回填，或用石灰、水泥等材料改良膨胀土相比，工程量小，造价低。从图 11 可知， $\lg P_{ox}$ - ε 关系呈线性，用下式表示：

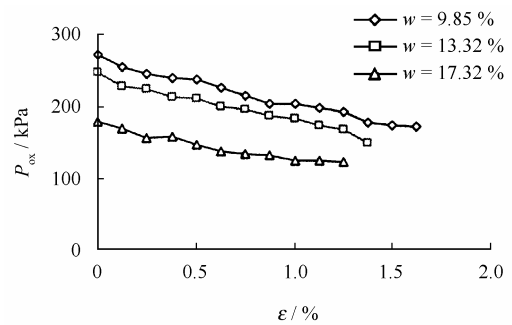
$$\lg \left(\frac{P_{ox}}{P_{atm}} \right) = a_2 + b_2 \varepsilon \quad (3)$$

同一干密度，不同含水率的试样 b_2 值相近，用 $\bar{b}_2$ 表示； a_2 值随含水率增加而减小。 a_2 、 b_2 取值见 6。 a_2 用含水量和干密度表示为

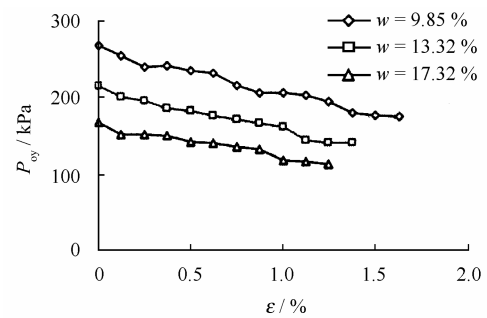
$$a_2 = 3.9408 + 0.00005 \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \right)^{18.4953} - 3.685w \quad (4)$$

$$\bar{b}_2 = 0.11436 + 0.004 \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \right)^{11.70114} \quad (5)$$

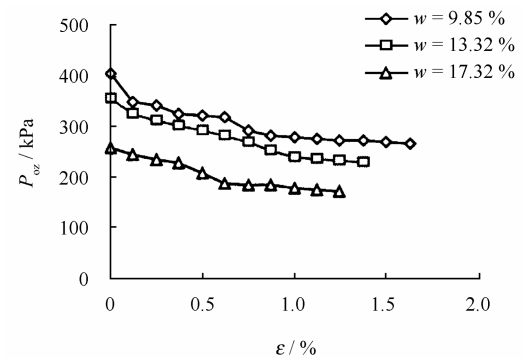
式中： w 为含水率； ρ_w 为水的密度。将式 (4)、式 (5) 代入式 (3) 即得到侧向膨胀力与变形关系式，由对应的侧向变形量可以计算出膨胀力。



(a) $\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$



(b) $\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$



(c) $\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$

图 10 三向膨胀力-变形曲线

Fig.10 Three-dimension swelling pressures-strain curves

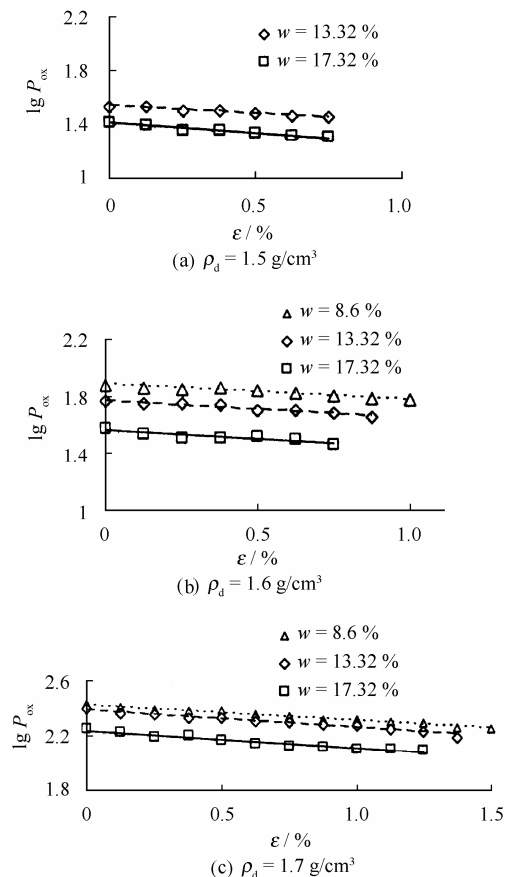


图 11 侧向膨胀力-变形关系

Fig.11 Lateral swelling pressure-strain relationships

表 6 参数 a_2 , b_2 的值Fig.6 The values of parameters a_2 and b_2

干密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水率 / $\%$	b_2	a_2	$\bar{b}_2$
1.5	13.32	0.118 4	3.536 8	0.119 5
	17.32	0.120 5	3.389 4	
1.6	9.85	0.122 6	3.893 7	0.125 3
	13.32	0.128 4	3.773 4	
	17.32	0.124 8	3.568 8	
1.7	9.85	0.133 6	4.444 9	0.136 6
	13.32	0.139 3	4.390 8	
	17.32	0.137	4.240 5	

6 结 论

(1) 竖向膨胀力总是大于水平膨胀力, 两者之间的比值随着土的含水率和干密度不同而变化。相同含水率时, 水平膨胀力与竖向膨胀力的比值随干密度的增大而增大。

(2) 与原状膨胀土不同, 重塑膨胀土湿胀干缩使土的膨胀力降低, 第一次干湿循环后膨胀力减小最多。

(3) 微小的水平变形就可以引起三向膨胀力的大幅度减小, 这一点对支挡结构设计有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 9—13.
LIU Song-yu, JI Peng, FANG Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(1): 9—13.
- [2] 卢再华. 非饱和膨胀土的弹塑性损伤本构模型及其在土坡多场耦和分析中的应用[博士学位论文 D]. 重庆: 重庆后勤工程学院, 2001.
- [3] 卢肇钧, 张惠明, 陈建华, 等. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 1—8.
LU Zhao-jun, ZHANG Hui-ming, CHEN Jian-hua. Shear strength and swelling pressure of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(3): 1—8.
- [4] 卢肇钧, 吴肖茗, 孙玉珍, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 20—27.
LU Zhao-jun, WU Xiao-ming, SUN Yu-zhen. The Role of swelling pressure in the shear strength theory of unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(5): 20—27.
- [5] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 非饱和膨胀土变形规律的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1999, 23(6): 36—39.
MIAO Lin-chang, ZONG Xiao-chen, YIN Zong-ze. Test research of unsaturated expansive soil strain laws[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 1999, 23(6): 36—39.
- [6] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [7] 黄熙龄, 方向. 膨胀土三向变形的特性[A]. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集[C]. 北京: 1992. 153—161.
- [8] 王园. 三向应力作用下膨胀土吸水变形性能[C]. 中加非饱和土学术研讨会[C]. 武汉: [s. n.], 1994, 206—213.
- [9] 张颖钧. 裂土侧向膨胀力国内外研究现状及述评[J]. 大坝观测与土工测试, 1993, 17(3): 28—32.
ZHANG Ying-jun. Study present situation and review at home and abroad of lateral swelling pressures of expansive soils[J]. 1993, 17(3): 28—32.
- [10] 包承纲. 膨胀土裂隙性研究[M]. 郑健龙、杨和平. 膨胀土处治理论、技术与实践. 北京: 人民交通出版社, 2004: 24—36.
- [11] AL-Homond A S, et al. Cyclic swelling behavior of clays[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(3).