

合肥重塑膨胀土三向应力 - 应变规律探讨

池泽成^{1,2}, 陈善雄², 戴张俊^{1,2}, 周哲^{1,2}, 宋瑞军^{1,2}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 以合肥重塑膨胀土为研究对象, 运用改进的“三向胀缩仪”开展一系列不同初始含水率与干密度的三向膨胀力试验, 以及控制竖向与侧向应变的下的膨胀力试验, 旨在了解膨胀土三向应力 - 应变的规律。研究结果表明: (1) 水平膨胀力与竖向膨胀力的比值均小于1, 也即竖向膨胀力总是大于水平膨胀力, 且水平膨胀力与竖向膨胀力比值 R_0 随着试样初始含水率与干密度的不同而不同, 变化范围为 0.525~0.904。(2) 在相同的初始含水率下, R_0 会随着干密度的增大而增大, 这说明, 随着试样干密度的增大, 土样的各向异性特性减弱。(3) 控制竖向变形的膨胀力变化曲线与控制侧向变形的水平膨胀力曲线变化趋势相似, 同样是微小的形变就能导致膨胀力的大幅减小, 并且应变越小时, 膨胀力衰减速率越快。

关键词: 土力学; 重塑膨胀土; 三向胀缩仪; 膨胀力; 应变

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)增1 - 3659 - 07

Research on strain regularity of three-dimensional stress of Hefei remolded expansive clay

CHI Zecheng^{1,2}, CHEN Shanxiong², DAI Zhangjun^{1,2}, ZHOU Zhe^{1,2}, SONG Ruijun^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: This paper studies the characteristic of remolded expansive clay in Hefei. A series of three-dimensional swelling tests were conducted for cubic expansive soil of different initial moisture contents and dry density as well as the swelling pressure tests under the control of the vertical strain and the lateral strain. The vertical swelling pressure is always bigger than lateral swelling pressure. Moreover, the range of R_0 change is between 0.525 and 0.904. Secondly, under the same initial moisture contents, R_0 will increase with the rise of dry density. At last, the study shows that the trends of evolution of swelling pressure under the control of the vertical strain and the evolution of the lateral swelling pressure under the control of the lateral strain are similar. The tiny strain would lead to the dramatic decrease of swelling pressure. Moreover, with the decline of the strain, the rate of decay of swelling pressure will increase.

Key words: soil mechanics; remolded expansive clay; three-dimensional swelling pressure instrument; swelling pressure; strain

收稿日期: 2017 - 01 - 03; **修回日期:** 2017 - 03 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579236)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51579236)

作者简介: 池泽成(1992 -), 男, 2014年毕业于长安大学地质工程专业, 现为博士研究生, 主要从事特殊土工程特性与处治技术方面的研究工作。

E-mail: 873540602@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1653

1 引言

我国膨胀土分布广泛，反复的降雨入参与干湿循环会造成土体内部产生裂隙，使膨胀土强度降低，造成一系列边坡灾害的发生。

目前，国内外学者对于该问题已经取得了很多的研究成果，但是这些都局限于膨胀土的一维状态，只关注了其竖向膨胀力^[1-8]。膨胀土浸水膨胀，其受力状态必然是三维的，产生竖向膨胀力的同时也会产生水平膨胀力，引起挡土墙、桩基、地下管道、涵洞的破坏^[9-11]。因此，弄清膨胀土浸水膨胀以后产生的水平膨胀力与竖向膨胀力大小的比值以及三向膨胀力随应变的变化规律对工程建筑物的稳定分析是非常有意义的。

张颖钧^[12]用“三向胀缩特性仪”研究了一些典型膨胀土的三向膨胀力，探究了竖向膨胀力和水平膨胀力之间的比值变化，并对比了无荷条件下单向膨胀力与三向膨胀力的大小关系。谢云等^[13-14]研究了南阳膨胀土在干湿循环与控制变形下的三向膨胀力的变化规律。秦冰等^[15]使用改进的三向胀缩仪，研究高庙子膨润土的三向膨胀力与试样初始状态的关系、不同方向膨胀力之间的关系，并探讨了膨胀力随时间变化的规律。

本文针对合肥膨胀土，根据不同的初始含水量和干密度共配置了 16 个试样，采用岩土所改进的“三向胀缩仪”对合肥重塑膨胀土样进行控制应变的膨胀力试验，探究了膨胀土膨胀力各向异性以及膨胀力与变形之间的关系规律。

2 仪器简介与土样制备

2.1 三向胀缩仪

试验应用中国科学院武汉岩土力学研究所的三向胀缩仪进行，该仪器是在铁道部科学研究院西北研究所以及后勤工程学院的三向胀缩仪基础上改进的，可同时测量控制三向任意应变下的膨胀力，由数据采集箱采集数据(见图 1)。

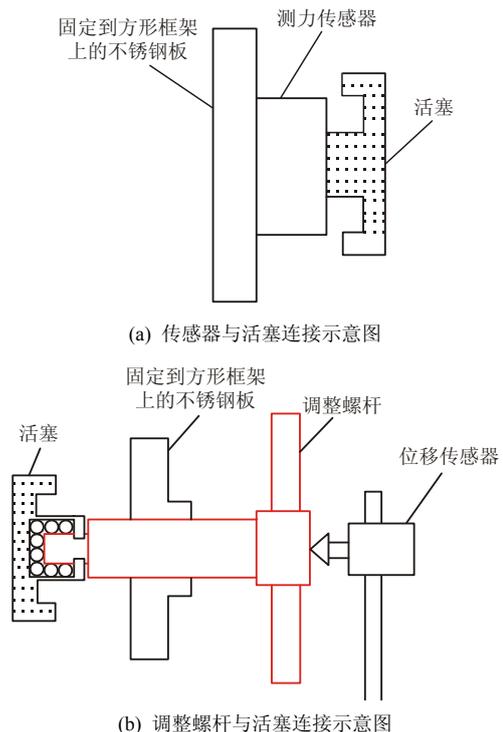
在原三向胀缩仪的基础上进行改进的部分主要包括：(1) 充分调研了我国膨胀土在环内的单向膨胀力变化范围，选用了最为合适的测力传感器，提高数据采集精度；(2) 压力传感器与承压活塞固定



图 1 三向胀缩仪

Fig.1 The test apparatus

使活塞悬空，避免活塞与框架侧壁摩擦；(3) 将调整螺杆和活塞连接到一起，通过几圈钢珠可以给活塞同时形成滑动约束和法向约束，使其悬空，避免活塞与框架侧壁摩擦，同时，又不妨碍调整螺杆对活塞的作用。将传感器、调整螺杆、活塞及不锈钢支座连成一体，可以从仪器上卸下标定，极大的减少了误差，见图 2。



(a) 传感器与活塞连接示意图

(b) 调整螺杆与活塞连接示意图

图 2 三向胀缩仪改进图示

Fig.2 The improved test apparatus

2.2 土样制备

制样器由 2 个正方形压样块、底座、套筒以及千斤顶组成(见图 3)，套筒高 120.0 mm，压样块边长 40.0 mm，套筒外框与 2 个压样块围成 40.0 mm×40.0 mm 的内空间。



(a) 压样块、底座 (b) 套筒

图 3 制样器

Fig.3 The quadratic sample case

制样步骤：(1) 将一压样块放入套筒底部，把准备好的土放入套筒里；(2) 另一个压样块从套筒上部放入；(3) 用千斤顶将上部压样块刚好压进套筒中；(4) 将底座的细端对准套筒中心，通过千斤顶把压实好的土块从模具中脱出。

3 试验方法与方案

3.1 制样方案

试验用土取自合肥引江济淮工程引水渠道边坡，重塑制样。其物理力学性质见表 1。根据自由膨胀率判断为弱膨胀土。

表 1 合肥膨胀土主要物理力学性质

Table 1 Main physico-mechanical properties of Hefei expansive soil

液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	自由膨胀率/ $\%$	相对密度 G_s
72	30	42	44	2.68

试验按照含水率分别为 9.84%，12.60%，16.25%，20.20%配置土样，在各含水率下制备干密度分别为 1.5，1.6，1.65，1.7 g/cm^3 的试样。制样过程中，首先将土样风干，人工碾碎后过 2 mm 的筛进行筛分，测定其风干含水量。根据试验要求配制出不同含水量的土样，将风干料和水搅拌均匀后装入塑料袋密封 24 h；再通过压样模具进行制样。具体流程见图 4。



图 4 制样流程

Fig.4 Sample preparation process

3.2 试验方案

共进行了 4 组不同初始含水率不同干密度的三向等压膨胀试验，1 组控制变形的三向膨胀力试验。试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

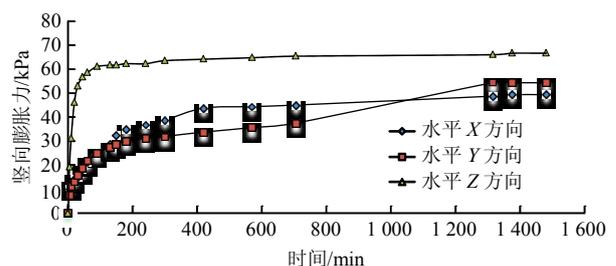
试验类型	试样编号	含水率/ $\%$	干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
应变为零的三向膨胀力试验	1 - 1	9.84	1.50
	1 - 2		1.60
	1 - 3		1.65
	1 - 4	12.60	1.70
	1 - 5		1.50
	1 - 6		1.60
	1 - 7	16.25	1.65
	1 - 8		1.70
	1 - 9		1.50
	1 - 10	20.20	1.60
	1 - 11		1.65
	1 - 12		1.70
	1 - 13	9.84	1.50
	1 - 14		1.60
	1 - 15		1.65
	1 - 16	1.70	
控制变形的三向膨胀力试验	1 - 17	9.84	1.60
	1 - 18		1.65
	1 - 19		1.70

做控制变形的三向膨胀力试验时，先进行三向膨胀力试验。待试样吸水膨胀力稳定后，首先调整纵向应变，使其变形量达到 0.05 mm，记录此时稳定读数，接着再调整使变形量达到 0.10 mm，记录读数，继续循环，得到三向膨胀力与纵向应变的关系；待纵向膨胀力为 0 后，调整水平应变，使其变形量达到 0.05 mm，记录此时稳定读数，接着再调整使变形量达到 0.10 mm，记录读数，继续循环，得到水平膨胀力与水平应变之间的关系。

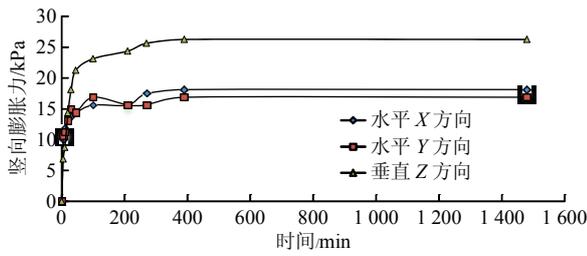
4 重塑膨胀土膨胀力各向异性分析

4.1 时程曲线分析

由于各组试验得出的三向膨胀力时程曲线特征都大致相同，故选取任意 2 组进行讨论说明，见图 5。由图 5 可以看出，在到达峰值膨胀力之前，三向膨胀力时程曲线随着速率的变化大致可以分为快速膨



(a) $\omega = 9.84\%$, $\rho_d = 1.65 \text{ g}/\text{cm}^3$



(b) $\omega = 20.20\%$, $\rho_d = 1.65\text{g/cm}^3$

图5 三向膨胀力时程曲线

Fig.5 Three-dimension swelling pressures-time curves

胀、缓慢膨胀和趋于稳定这3个阶段；在竖向与水平膨胀力时程曲线的快速膨胀阶段前期，两者的时程曲线基本重合，这表明此时两者膨胀速率大致相同；在快速膨胀后期，水平膨胀速率快速减小，迅速进入缓慢膨胀阶段，而竖向膨胀力时程曲线此时仍处于快速膨胀阶段，并且膨胀速率依旧很大。

4.2 竖向膨胀力与横向膨胀力特性比较

由于为单向压样的制样方法，压实过程中竖向压力与水平压力不同，即造成试样的各向异性，这一点从图5也可以看出，竖向膨胀力总是大于水平膨胀力，X向膨胀力与Y向膨胀力大小相近，但是或多或少都存在一些差异，这可能是压样过程中产生的误差，本文比较两者特性时，水平膨胀力取X，Y向的平均值进行讨论。为方便叙述，下文所指水平膨胀力均为X，Y向膨胀力的平均值。

表3为不同含水率与干密度下试样的三向膨胀力的试验结果， R_0 为水平膨胀力与竖向膨胀力的比

表3 重塑膨胀土膨胀力

Table 3 Swelling pressures of remolded expansive soil

含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	P_x/kPa	P_y/kPa	P_z/kPa	R_0
	1.50	-	-	-	-
9.84	1.60	36.875	32.500	48.125	0.721
	1.65	49.375	54.375	66.875	0.776
	1.70	80.625	77.500	87.500	0.904
	1.50	26.875	20.000	33.750	0.694
12.60	1.60	30.000	35.625	43.125	0.761
	1.65	42.500	41.250	53.125	0.788
	1.70	63.750	58.750	70.625	0.867
	1.50	17.500	13.125	25.625	0.598
16.25	1.60	23.750	20.000	31.875	0.686
	1.65	34.375	36.250	43.750	0.807
	1.70	43.750	43.125	49.375	0.880
	1.50	5.625	7.500	12.500	0.525
20.20	1.60	11.250	9.375	17.500	0.589
	1.65	18.125	16.875	26.250	0.667
	1.70	25.625	18.750	33.125	0.670

注： P_x ， P_y ， P_z 分别为X向水平膨胀力、Y向水平膨胀力、竖向膨胀力。下同。

值。可以看出，竖向膨胀力总是大于水平膨胀力； R_0 随着试样初始含水率与干密度的不同而不同，变化范围为0.525~0.904，谢云等^[13]对南阳膨胀土进行三向膨胀力试验得出 R_0 在0.367~0.679范围内，张颖钧^[12]对6种原状土样进行了试验，得出试样水平与竖向膨胀力的比值为0.376~0.646，本文得出的数据有所偏大。

4.3 R_0 与干密度关系

由表3数据可以绘出水平膨胀力与竖向膨胀力之比和干密度的变化如图6所示。

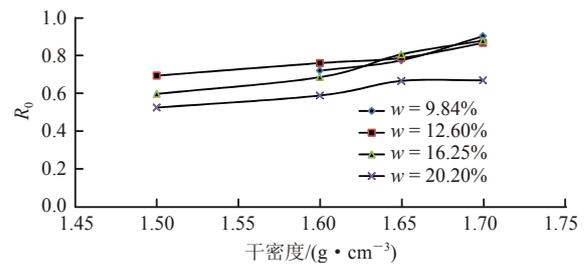


图6 ω 相同时 R_0 与 ρ_d 的关系曲线

Fig.6 Curves of R_0 with ρ_d under that ω is constant

根据图6可得，在相同的初始含水率下， R_0 会随着干密度的增大而增大，这说明，随着试样干密度的增大，土样的各向异性特性减弱。原因分析：膨胀土中的亲水性矿物蒙脱石结合水分子后体积变大，是导致膨胀土产生膨胀的根本原因。蒙脱石颗粒是由矿物晶层叠加而成，水分子进入到晶层之间使得晶层间距增大，从而使蒙脱石颗粒体积增大。

随着晶层间距的增大，晶层之间的膨胀力将会减小。膨胀土压实后土体中尚存在孔隙，遇水之后，膨胀土中的蒙脱石颗粒吸水致使自身体积增大，将首先充填周围的孔隙。如果保持土体体积不变，当蒙脱石颗粒将孔隙填充之后，将会受到周围颗粒的限制而不能膨胀，被限制颗粒由此产生的膨胀力将会向周围颗粒传递，最终产生宏观膨胀力^[16]。

在三向膨胀力试验中，蒙脱石叠片的取向会导致膨胀力产生各向异性。制样时，将松散的土样倒入模具中，可认为蒙脱石叠片取向是随机的，此时不存在各向异性^[15]。由于是单向压样，对于初始干密度较低的试样，压实后土样内的团粒间本身就存在较为明显的大孔隙，故在制样过程中，体积的变化主要源自纵向土颗粒以及团粒间空隙的减少，而此时横向颗粒间的空隙仍然较大，故在吸水膨胀时，膨胀的蒙脱石晶体首先会填满纵向颗粒间空隙，而在晶体填充横向颗粒间孔隙时，其已经释放了较多的膨胀势，最终导致纵向膨胀力远大于横向膨胀力。

对于初始干密度较大的试样，制样完成后，土样是非常紧实的，所以其在压实的过程中，无论颗粒间的横向还是纵向间距都会产生较大的压缩。干密度越大，两者间距越接近，所以在吸水膨胀时，最终纵向膨胀力与横向膨胀力接近，土样各向异性特征减弱， R_0 较大。

4.4 R_0 与含水率关系

由表 3 数据也可以绘出水平膨胀力与竖向膨胀力之比和初始含水率的变化如图 7 所示。

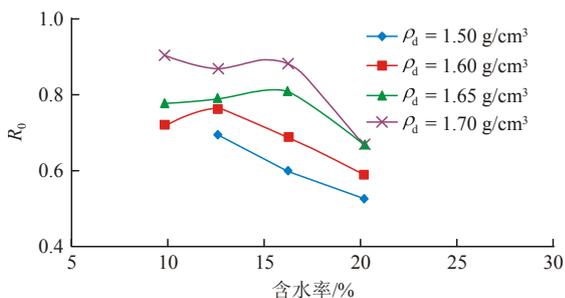


图 7 ρ_d 相同时 R_0 与 ω 的关系曲线

Fig.7 Curves of R_0 with ω under that ρ_d is constant

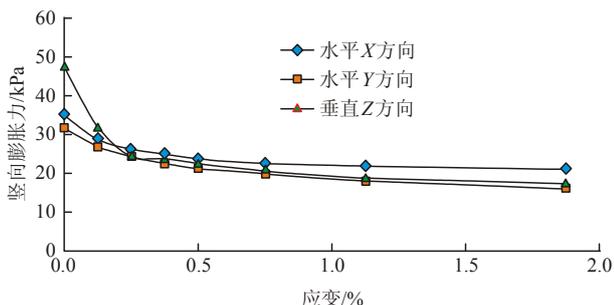
由图 7 可知，在相同的初始干密度下， R_0 随着含水率的变化整体没有明显的规律可循，但在含水率为 15%~20%时， R_0 呈现明显的下降趋势。

5 控制变形的三向膨胀力结果分析

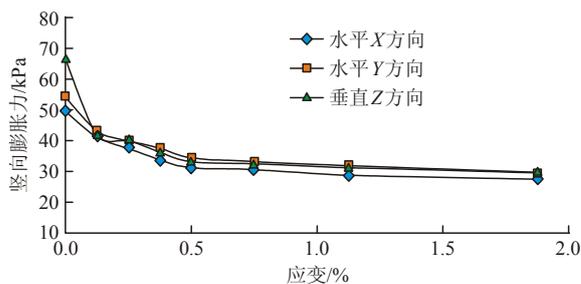
工程上膨胀土边坡在雨水作用下发生膨胀时，其上部会发生一定的变形，所以弄清考虑变形的情况下，土体三向膨胀力的大小变化规律显得尤为重要。

5.1 控制竖向变形的三向膨胀力试验结果分析

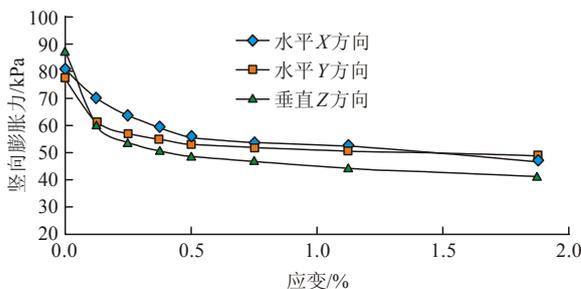
图 8 为释放纵向约束下，不同初始条件土样的三向膨胀力变化曲线，其中横坐标为土样线应变，即用竖向变形除以土样的初始宽度为 4 cm 的百分比。可以看出，随着竖向应变的增大，各情况下土样的三向膨胀力均在减小。膨胀力与竖向应变曲线大致可以分为快速减小、缓慢减小以及趋于稳定 3 个阶段，这也就是说微小的形变就能导致膨胀力的大幅减小，并且应变越小时，膨胀力衰减速率越快。



(a) $\omega = 9.84\%$, $\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$



(b) $\omega = 9.84\%$, $\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$



(c) $\omega = 9.84\%$, $\rho_d = 1.70 \text{ g/cm}^3$

图 8 三向膨胀力 - 竖向变形曲线

Fig.8 Three-dimension swelling pressure-longitudinal strain curves

根据试验数据绘制出不同竖向应变率下膨胀力衰减量的表格见表 4。

表 4 竖向应变率 - 膨胀力衰减量

Table 4 Vertical strain rate-expansion force attenuations

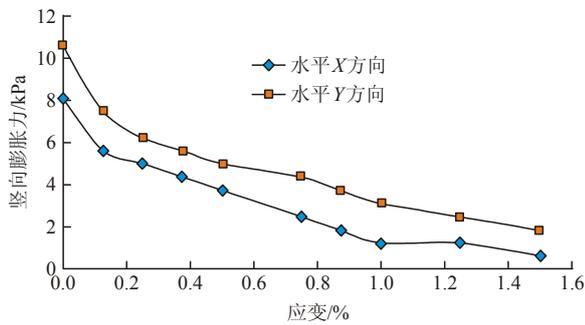
含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	竖向应变率/%	P_x 衰减量/%	P_y 衰减量/%	P_z 衰减量/%
		0.125	17.86	15.69	32.89
		0.375	28.57	29.41	50.00
		1.875	39.29	49.02	63.16
9.84	1.65	0.125	16.46	20.69	37.38
		0.375	31.65	31.03	45.79
		1.875	44.30	45.98	55.14
	1.70	0.125	13.18	20.97	31.43
		0.375	26.36	29.03	42.14
		1.875	41.86	37.10	52.86

由表 4 可以看出，任何情况下，竖向膨胀力的衰减量均大于横向膨胀力的衰减量；在竖向应变仅仅达到 0.125%时，竖向膨胀力就减小超过 30%，在竖向应变达到 0.375%时，竖向膨胀力衰减已经接近 50%。

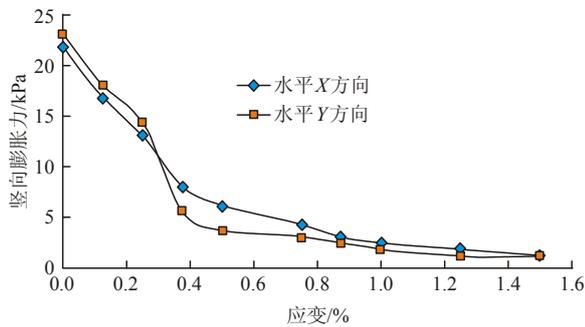
5.2 控制侧向变形的水平膨胀力试验结果分析

在土体完全释放竖向膨胀力后，探究侧向应变的改变对水平膨胀力的影响对工程实际有着重

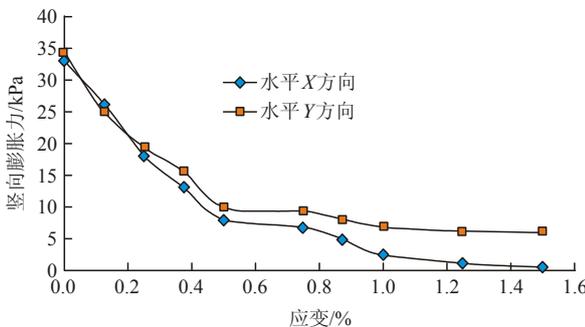
要的指导意义。对 X 与 Y 向同时释放应变，可以得到不同初始条件下土样的水平膨胀力变化曲线，见图 9。



(a) $\omega = 9.84\%$, $\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$



(b) $\omega = 9.84\%$, $\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$



(c) $\omega = 9.84\%$, $\rho_d = 1.70 \text{ g/cm}^3$

图 9 水平膨胀力 - 侧向变形曲线

Fig.9 Lateral swelling pressure-lateral strain curves

从图 9 可以看出，控制侧向变形的水平膨胀力变化曲线与控制竖向变形的水平膨胀力曲线变化趋势相似，同样是微小的侧向形变就能导致水平膨胀力的大幅减小，并且应变越小时，膨胀力衰减速率越快。

根据试验数据绘制出不同侧向应变率下水平膨胀力的衰减量见表 5，由表可以看出，在侧向应变仅仅达到 0.25%时，水平膨胀力就减小接近 40%，在侧向应变达到 1%时，水平膨胀力已经衰减超过 70%。

表 5 侧向应变率 - 膨胀力衰减量

Table 5 Lateral strain rate-expansion force attenuation

含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	侧向应变率/%	P_x 衰减量/%	P_y 衰减量/%
		0.25	38.46	41.18
		0.50	53.85	52.94
		1.00	84.62	70.59
9.84	1.65	0.25	40.00	37.84
		0.50	71.43	83.78
		1.00	88.57	91.89
		0.25	45.28	43.64
		0.50	75.47	70.91
		1.00	92.45	80.00

6 结 论

本文开展合肥膨胀土在不同初始含水量和干密度下的浸水三向膨胀力试验和控制应变过程下的膨胀力试验，并对试验结果进行了分析，得到的主要结论如下：

- (1) R_0 随着试样初始含水率与干密度的不同而不同，变化范围为 0.525~0.904；
- (2) 在相同的初始含水率下， R_0 会随着干密度的增大而增大，这说明，随着试样干密度的增大，土样的各向异性特性减弱；
- (3) 控制竖向变形的膨胀力变化曲线与控制侧向变形的水平膨胀力曲线变化趋势相似，同样是微小的形变就能导致膨胀力的大幅减小，并且应变越小时，膨胀力衰减速率越快。

参考文献(References):

[1] 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(3): 36 - 39.(LIAO Linchang, ZHONG Xiaochen, YIN Zongze. Test research of unsaturated expansive soil strain laws[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1999, 23(3): 36 - 39.(in Chinese))

[2] 戴张俊. 考虑湿胀软化效应的膨胀土边坡变形与稳定性分析[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2014.(DAI Zhangjun. Analysis of deformation and stability of expansive soil slope considering swelling and strength softening[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.(in Chinese))

[3] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬, 等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材

- 料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1): 44 - 47.(LIU Yuemiao, XU Guoqing, LIU Shufen, et al. Study on compatibility and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. Uranium Geology, 2001, 17(1): 44 - 47.(in Chinese))
- [4] 叶为民, SCHANZ T, 钱丽鑫, 等. 高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 3 861 - 3 865.(YE Weimin, SCHANZ T, QIAN Lixin, et al. Characteristics of swelling pressure of densely compacted Gaomiaozi bentonite GMZ01[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 3 861 - 3 865.(in Chinese))
- [5] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 478 - 490.
- [6] 徐永福, 吴正根, 刘传新. 膨胀土的击实条件与膨胀变形的相关性研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(3): 57 - 60.(XU Yongfu, WU Zhenggen, LIU Chuanxin. Relativity between compaction conditions and swelling deformation of expansive soil[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(3): 57 - 60.(in Chinese))
- [7] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 555 - 1 559.(TAN Luorong, KONG Lingwei. Study on variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1 555 - 1 559.(in Chinese))
- [8] 刘泉声, 王志俭. 砂 - 膨润土混合物膨胀力影响因素的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 054 - 1 058.(LIU Quansheng, WANG Zhijian. Influence factors of sand-bentonite mixtures on the swelling pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1 054 - 1 058.(in Chinese))
- [9] 邹越强, 李永康, 助孟新. 膨胀土侧压力研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1993, 16(3): 109 - 114.(ZOU Yueqiang, LI Yongkang, ZHU Mengxin. Expansive soil lateral pressure research[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 1993, 16(3): 109 - 114.(in Chinese))
- [10] 殷宗泽. 土的侧膨胀性及其对土石坝应力变形的影响[J]. 水利学报, 2000, (7): 49 - 55.(YIN Zongze. The lateral expansion of soil and its influence on the deformation and stress of the earth-rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (7): 49 - 55.(in Chinese))
- [11] 朱志铎, 刘松玉. 非饱和膨胀土的主动土压力分析[J]. 公路交通科技, 2001, 18(5): 8 - 10.(ZHU Zhize, LIU Songyu. Active earth pressure analysis of unsaturated expansive soil[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2001, 18(5): 8 - 10.(in Chinese))
- [12] 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 Yinjun. Study present situation and review at home and abroad of lateral swelling pressures of expansive soil[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1993, 17(3): 28 - 32.(in Chinese))
- [13] 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): 1 636 - 1 642.(XIE Yun, CHEN Zhenghan, SUN Shuguo, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of bentonite clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1 636 - 1 642.(in Chinese))
- [14] 谢云, 陈正汉, 李刚, 等. 南阳膨胀土二向膨胀力规律研究[J]. 后勤工程学院学报, 2006, 22(1): 11 - 14.(XIE Yun, CHEN Zhenghan, LI Gang, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of Nanyang expansive soil[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2006, 22(1): 11 - 14.(in Chinese))
- [15] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 756 - 763.(QIN Bing, CHEN Zhenghan, LIU Yuemiao, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 756 - 763.(in Chinese))
- [16] 贾景超, 宋日英, 黄志全. 基于膨胀力试验数据的膨胀土膨胀应变模型[J]. 铁道建筑, 2012, (11): 110 - 112.(JIA Jingchao, SONG Riyang, HUANG Zhiquan. Based on the expansion force test data of the expansive soil strain model[J]. Railway Engineering, 2012, (11): 110 - 112.(in Chinese))