

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.047

合肥重塑膨胀土三向膨胀力试验研究

池泽成^{1,2}, 陈善雄², 周 哲^{1,2}, 戴张俊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, 采用改进的三向胀缩仪开展了 16 组不同初始含水率与干密度的三向膨胀力试验。研究表明, (1) 在所研究的含水率、干密度范围内竖向膨胀力总是大于横向膨胀力, 快速膨胀阶段大致在 0~2 h 以内, 该阶段竖向膨胀力可达到极限膨胀力的 80% 以上; (2) 同一干密度下竖向膨胀力随初始含水率增大而减小, 竖向膨胀力与初始含水率之间具有良好的线性关系, 且干密度越大, 竖向膨胀力随着初始含水率的变化速率越大; (3) 在竖向膨胀力与干密度的关系图中, 每条曲线均以干密度 1.6 g/cm^3 为分界点呈双线性关系; (4) 由膨胀力对数与初始干密度的关系, 不同初始含水率下的 $\ln(P_z)-\rho_d$ 关系为一系列近似平行的递增直线, 直线斜率大致相同, 说明膨胀力随初始干密度的变化速度不随含水率的变化而变化。

关 键 词: 重塑膨胀土; 三向胀缩仪; 竖向膨胀力; 水平膨胀力

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0381 - 06

An experimental study of three-dimensional swelling pressure of Hefei remolded expansive clay

CHI Ze-cheng^{1,2}, CHEN Shan-xiong², ZHOU Zhe^{1,2}, DAI Zhang-jun², SONG Rui-jun^{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 characteristics of Hefei remolded expansive clay. A series of three-dimensional swelling tests is conducted on cubic expansive soil of different initial moisture contents and dry densities. For the specimens investigated in this study, three-dimensional swelling pressures are unequal. The vertical swelling pressure is larger than lateral swelling pressure. The period of the rapid expansion is about 0-2 h; the vertical swelling pressure can reach more than 80% of the limit swelling pressure. Secondly, under the same dry density, the vertical swelling pressure decreases with the rise of initial moisture content; and there is a good linear relationship between these two elements. Meanwhile, with the increase of dry density, the rate of change between them also rises correspondingly. Furthermore, the graph of the relationship between the vertical swelling pressure and dry density illustrates that each curve presents bilinear relation based on the segmentation point which is dry density of 1.6 g/cm^3 . At last, from the graph of the relationship between the logarithm of swelling pressure and initial dry density, it can be seen that the relationship of $\ln(P_z)-\rho_d$ under different initial moisture contents displays a series of approximately paralleled and incremental straight line. And the similar slopes, of these lines demonstrate that the rate of change between swelling pressure and the initial dry density dose not change with the variation of moisture content.

Keywords: remolded expansive clay; three-dimensional swelling pressure instrument; vertical swelling pressure; lateral swelling pressure

1 引 言

引江济淮是继国家重大水利工程南水北调中线工程之后又一件大型水利工程, 以工业和城市供

水为主, 兼有农业灌溉补水、生态环境改善和发展江淮航运等综合效益的大型跨流域调水工程, 对安徽省水资源配置战略工程和全省经济社会发展与水环境改善有重大意义。项目合肥工程段处于膨胀土质区, 由于吸水与失水引起膨胀土的胀缩变形, 在

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51579236)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51579236).

第一作者简介: 池泽成, 男, 1992 年生, 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

大气营力作用下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，弄清楚膨胀土吸水膨胀过程中膨胀力的变化规律就显得尤其重要。国内外学者针对该问题已经取得了不少的研究成果，但这些研究都局限于一维状态，只关注了一个方向的膨胀力^[1-8]，土体的实际应力状态是三维的，对膨胀土进行三向的胀缩试验才能更准确地了解土体的应力-应变规律。张颖钧^[9]使用自行研制的三向胀缩特性仪研究了一些典型膨胀土的三向膨胀力，并对比了垂直膨胀力和水平膨胀力之间的关系。谢云等^[10-11]对原铁道部科学院西北研究院的“三向胀缩特性仪”进行了改进，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。杨长青等^[12]对广西宁明重塑膨胀土开展了不同初始含水率和三向压力的膨胀试验，研究了三向压力对胀限、膨胀力的影响规律。秦冰等^[13]使用改进的三向胀缩仪，研究了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率和干密度配置了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膨胀力试验，探究其膨胀力特性。

2 膨胀土三向胀缩仪与制样器

2.1 三向胀缩仪

本次试验仪器是中国科学院武汉岩土力学研究所的三向胀缩仪，仪器是在铁道部科学研究所、后勤工程学院的三向胀缩仪基础上改进，可以同时测量在任意控制应变下的三向膨胀力，由数据采集箱采集数据，见图1。



图1 三向胀缩仪
Fig.1 Test apparatus

在原三向胀缩仪的基础上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，如图2所示。

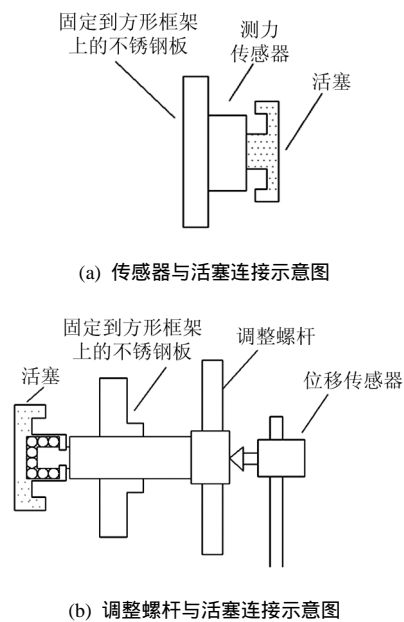


图2 三向胀缩仪改进示意图

Fig.2 Sketch of improved test apparatus

2.2 土样制备器

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120mm，压样块边长40mm，套筒外框与2个压样块围成40mm×40mm空间。

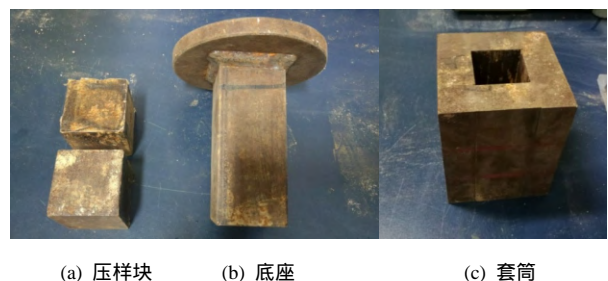


图3 制样器
Fig.3 Quadratic sample case

制样步骤：将一压样块放入套筒底部，把备好的土放入套筒里。另一个压样块从套筒上部放入。用千斤顶将上部压样块刚好压进套筒中。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 /%	土粒相对密度 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 1.50、1.60、1.65、1.7 g/cm³ 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，测定其风干含水率。根据试验要求配制出不同含水率的土样，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，试验方案见表 2。

表 2 试验方案
Table 2 Test schemes

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	9.84	1.50	1-9	16.25	1.50
1-2		1.60	1-10		1.60
1-3		1.65	1-11		1.65
1-4		1.70	1-12		1.70
1-5	12.60	1.50	1-13	20.20	1.50
1-6		1.60	1-14		1.60
1-7		1.65	1-15		1.65
1-8		1.70	1-16		1.70

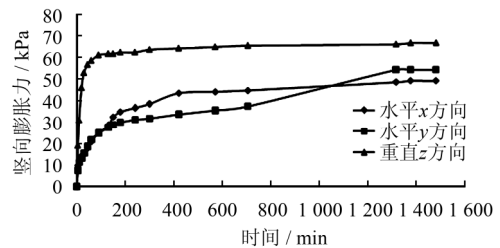
进行应变为 0 的三向膨胀力试验时将试样装入仪器，安上百分表后施加 1 kPa 的初始压力，然后对试样加水，整个试验过程中 3 个方向试样的变形量始终为 0。按时记录膨胀力和添加适量水，当膨

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极限膨胀力。

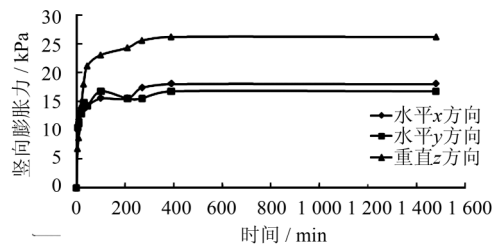
4 膨胀土的三向膨胀力变化规律

4.1 三向膨胀力时程曲线规律

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，如图 5 所示。由图中可以看出，浸水膨胀时膨胀土的时程曲线随着速率的变化而变化，基本可以分为快速膨胀、缓慢膨胀和趋于稳定 3 个阶段，由于试验开始阶段膨胀土吸水较多，导致结合水膜增厚，“楔开”土颗粒，使固体颗粒之间的距离增大^[14]，产生体积膨胀，膨胀率增大，且增长显著，之后膨胀率增长幅度变小。水分渐渐充满孔隙，膨胀土吸水率变小，膨胀率增长幅度变小。最后膨胀土吸水达到稳定状态，膨胀率保持不变^[15]。



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



(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 pressure-time curves

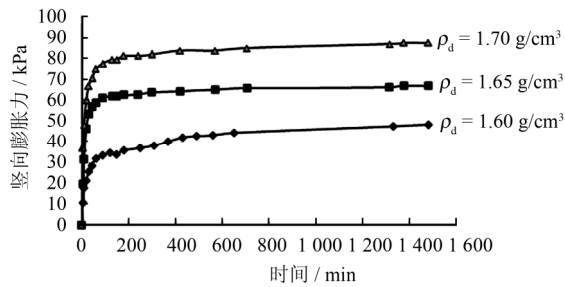
对于竖向膨胀力时程曲线，快速膨胀阶段 0~2 h 以内膨胀力达到极限膨胀力的 80% 以上。缓慢膨胀阶段在 2~6 h 之间，膨胀土基本完成膨胀，膨胀力接近最大值，与李献民对湖南邵阳膨胀土研究得出的结论基本一致^[16]，3 个阶段结束，全程基本保持在 24 h 以内。

对于水平膨胀力时程曲线，由于初始状态的差别，导致前两阶段的历时长短与竖向膨胀力时程曲线有所差别，但无论是水平 x 向或是水平 y 向均在 24 h 内达到极限膨胀，并且两者最终值差别很小。

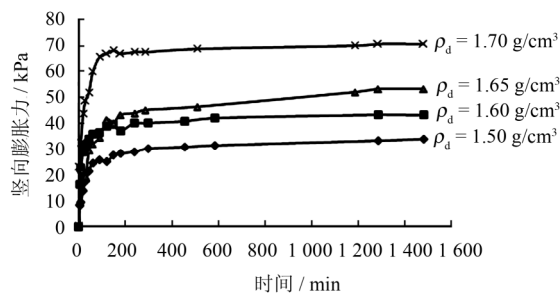
4.2 竖向膨胀力时程曲线规律

图 6 为不同含水率下不同干密度的竖向膨胀力

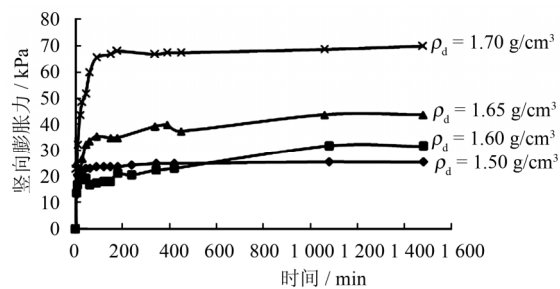
时程曲线对比,每一初始条件下的竖向极限膨胀力见表3。由于含水率为9.84%,干密度为1.50 g/cm³的土样压制太松散,故该组放弃。



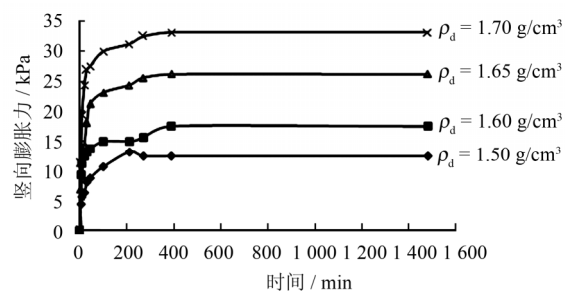
(a) $\omega = 9.84\%$



(b) $\omega = 12.60\%$



(c) $\omega = 16.25\%$



(d) $\omega = 20.20\%$

图6 竖向膨胀力与时间曲线

Fig.6 Curves of vertical swelling pressure and time

由图6可知,初始含水率一定时,干密度越高,初始膨胀速率越大。是由于当膨胀土干密度大时,体积含水率小,相应的基质吸力会达到很高的值,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^[17]。初始基质吸力越高,土的膨胀速度就越快。相同的,同一干密度的试样含水率越小,膨胀速度越快。

表3 重塑膨胀土的膨胀力

Table 3 Swelling pressures of remolded expansive soil

含水率/%	干密度/(g/cm ³)	P_x / kPa	P_y / kPa	P_z / kPa
9.84	1.50			
	1.60	36.875	32.500	48.125
	1.65	49.375	54.375	66.875
	1.70	80.625	77.500	87.500
12.60	1.50	26.875	20.000	33.750
	1.60	30.000	35.625	43.125
	1.65	42.500	41.250	53.125
16.25	1.70	63.750	58.75	70.625
	1.50	17.500	13.125	25.625
	1.60	23.750	20.00	31.875
20.20	1.65	34.375	36.250	43.750
	1.70	43.750	43.125	49.375
	1.50	5.625	7.500	12.500
	1.60	11.250	9.375	17.500
	1.65	18.125	16.875	26.250
	1.70	25.625	18.750	33.125

4.3 竖向膨胀力与初始含水率关系

依据表3中的数据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对应的竖向膨胀力如图7所示。从图中可以看出,同一干密度下竖向膨胀力随初始含水率增大而减小;竖向膨胀力与初始含水率之间具有良好的线性关系,不同干密度下的 $P_z - \omega$ 关系式可表示为 $P_z = A\omega + B_0$ 。各干密度下的 $P_z - \omega$ 回归分析式见表4。

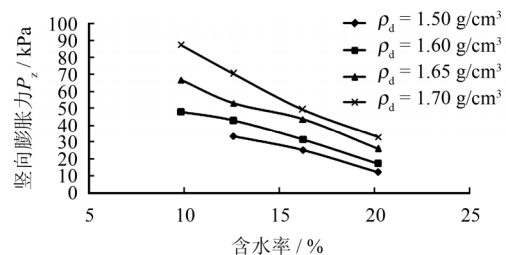


图7 ρ_d 相同时 P_z 与 ω 的关系曲线

Fig.7 Curves of P_z and ω for a same value of ρ_d

表4 不同干密度竖向膨胀力与初始含水率的回归关系式

Table 4 Formulas of P_z and under different dry density ω

干密度/(g/cm ³)	回归分析式
1.50	$P_z = -2.803w_0 + 69.79$
1.60	$P_z = -2.998w_0 + 79.30$
1.65	$P_z = -3.768w_0 + 102.9$
1.70	$P_z = -5.277w_0 + 137.8$

根据表 4 绘制出回归分析式的斜率与干密度的关系如图 8 所示。从图中可以看出，干密度越大，竖向膨胀力随着初始含水率的变化速率越大；整条曲线大致分为两段：干密度在 1.5 ~ 1.6 g/cm³ 之间时斜率有变化较小，竖向膨胀力随初始含水率的变化速率基本一致；干密度在 1.6 ~ 1.7 g/cm³ 之间时斜率明显变大，也说明此时干密度越大，竖向膨胀力随初始含水率变化速率越大。

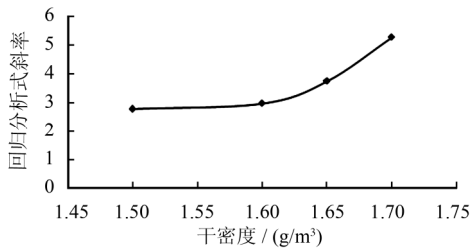


图 8 回归分析式斜率与 ρ_d 关系曲线
Fig.8 Curve of slope and ρ_d in regression analysis

谢云等^[10]对南水北调中线工程膨胀土进行了不同含水率与不同干密度的膨胀力试验，数据整理和回归分析时发现，竖向膨胀力随初始含水率的变化速率会因为干密度的增大而增大，与本文得到的竖向膨胀力随含水率变化趋势一致。

4.4 竖向膨胀力与初始干密度关系

依据表 3 中的数据也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 9 所示。从图中可以看出，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/cm³ 时的膨胀力是干密度为 1.5 g/cm³ 时的膨胀力的 2.6 ~ 3.4 倍之间；谢云针对南阳膨胀土的试验数据得到初始含水率相同时竖向膨胀力与干密度的关系，并用指数函数对曲线进行拟合，合肥膨胀土的关系曲线以干密度 1.6 g/cm³ 为分界点呈双线性关系。

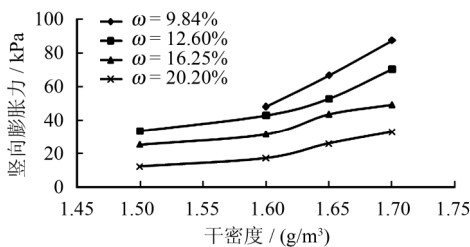


图 9 含水量 ω 相同时 P_z 与 ρ_d 的关系曲线
Fig.9 Curves of P_z and ρ_d for constant ω

绘制膨胀力对数与初始干密度的关系如图 10 所示。从图中不难看出，不同初始含水率下的 ln(P_z)-ρ_d 关系为一系列线性递增直线，直线斜率大

致相同，说明膨胀力随初始干密度的变化速度不随含水率的变化而变化，因此可用下式描述膨胀力与干密度之间的关系：

$$\ln(P_z) = C\rho_d + f(\omega) \quad (1)$$

式中：C 为试验参数；f(ω)为图中直线在 ln(P_z)轴上截距随初始含水率变化的函数。

各初始含水率下的回归分析式参数的取值见表 5。

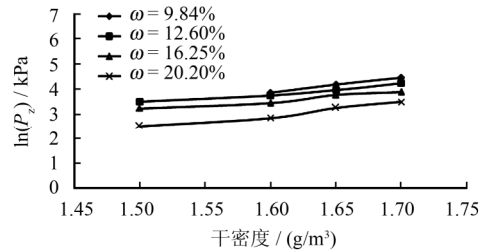


图 10 含水量 ω 相同时 ln(P_z)与 ρ_d 的关系曲线
Fig.10 Curves of ln(P_z) and ρ_d for constant ω

表 5 回归分析式参数取值
Table 5 Regression analysis parameters of the formulas

初始含水率/%	C	f(ω)
9.84	4.490	-1.700
12.60		-1.912
16.25		-2.187
20.20		-2.477

5 结 论

(1) 竖向膨胀力总是大于横向膨胀力。竖向膨胀力的快速膨胀阶段大致在 0 ~ 2 h 以内，此时膨胀力可达到极限膨胀力的 80% 以上，三向膨胀力均在 24 h 内达到最大值。

(2) 同一干密度下竖向膨胀力随初始含水率增大而减小，竖向膨胀力与初始含水率之间具有良好的线性关系，且干密度越大，竖向膨胀力随着初始含水率的变化速率越大。

(3) 在竖向膨胀力与干密度的关系图中每条曲线均以干密度 1.6 g/cm³ 为分界点，呈双线性关系。

(4) 不同初始含水率下的 ln(P_z)-ρ_d 关系为一系列近似平行的递增直线，直线斜率大致相同，说明膨胀力随初始干密度的变化速度不随含水率的变化而变化。

参 考 文 献

[1] 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[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2014.
DAI Zhang-jun. Analysis of deformation and stability of

- expansive soil slope considering swelling and strength softening[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [2] 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.
MIAO Lin-chang, ZHONG Xiao-chen, YIN Zong-ze. Test research of unsaturated expansive soil strain laws[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 1999, 23(3): 36 - 39.
- [3] 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]. 岩土力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3861 - 3865.
YE Wei-min, SCHANZ T, QIAN Li-xin. et al. Characteristics of swelling pressure of densely compacted gaomiaozi bentonite GMZ01[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3861 - 3865.
- [4] 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 Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen. et al. Study on compatibility and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. **Uranium Geology**, 2001, 17(1): 44 - 47.
- [5] 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): 1054 - 1058.
LIU Quan-sheng, WANG Zhi-jian. Influence factors of sand-bentonite mixtures on the swelling pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 1054 - 1058.
- [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 Yong-fu, WU Zheng-gen, LIU Chuan-xin. Relativity between compaction conditions and swelling deformation of expansive soil[J]. **Journal of Hohai University**, 1997, 25(3): 57 - 60.
- [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): 1555 - 1559.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Study on variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1555 - 1559.
- [8] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(4): 478 - 490.
- [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 Yin-jun. 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.
- [10] 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.
XIE Yun, CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of bentonite clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1636 - 1642.
- [11] 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 Zheng-han, 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.
- [12] 杨长青, 董东, 谭波, 等. 重塑膨胀土三向膨胀变形试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 188 - 195.
YANG Chang-qing, DONG Dong, TAN Bo, et al. Laboratory tests on three-directional swelling deformation of remolded expansive soil[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(2): 188 - 195.
- [13] 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 Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 22(2): 188 - 195.
- [14] 王保田, 张福海. 膨胀土的改良技术与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WANG Bao-tian, ZHANG Fu-hai. Improvement technology of expansive soil and engineering applications[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [15] 胡瑾, 王保田, 张文慧, 等. 无荷和有荷条件下膨胀土变形规律研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 335 - 338.
HU Jin, WANG Bao-tian, ZHANG Wen-hui, et al. Deformation trends of expansive soils under free and loading condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(8): 335 - 338.
- [16] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 击实膨胀土工程变形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 826 - 830.
LI Xian-min, WANG Yong-he, YANG Guo-lin, et al. Test study on engineering deformation characteristics of compacted expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 826 - 830.
- [17] 郑健龙, 杨和平. 膨胀土处治理论、技术与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 24 - 36.
ZHENG Jian-long, YANG He-ping. Expansive soil treatment theory, technology and practice[M]. Beijing: **China Communications Press**, 2005: 24 - 36.