

DOI: 10.11779/CJGE201904025

## 邯郸强膨胀土三向膨胀力特性试验研究

刘洪伏<sup>1</sup>, 汪时机<sup>\*1</sup>, 李 贤<sup>1, 2</sup>, 梁广川<sup>1</sup>, 沈泰宇<sup>1</sup>, 何丙辉<sup>2</sup>

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 对在不同干密度、初始含水率、温度下的邯郸强膨胀土和复合改性后的膨胀土进行三向膨胀力试验研究。结果表明, 在试验条件范围(干密度: 1.2, 1.35, 1.5, 1.65 g/cm<sup>3</sup>; 初始含水率: 15%, 18%, 21%, 24%; 温度: 20℃, 35℃, 45℃, 55℃, 65℃)内, 坚向与水平向膨胀力的比值随干密度增加而增加, 干密度等于1.2 g/cm<sup>3</sup>时, 比值接近1; 干密度是决定平衡时间的关键因素, 干密度越大的试样膨胀平衡时间越长, 且所有试样平衡时间都在3000 min内; 在室内常温(20℃左右)和初始含水率相同时, 坚向膨胀力随干密度呈指数关系递增; 相同温度和干密度下, 随着初始含水率增加, 三向膨胀力皆呈线性减小的规律, 且三向膨胀力与初始含水率关系曲线的斜率随干密度线性递增; 经过0.8%PVA(聚乙烯醇)+5%KCl(氯化钾)的混合溶液改性, 并添加0.6%聚丙烯纤维后的土样坚向膨胀力下降33.3%, 0.8%PVA+4%CaO(氧化钙)的混合溶液改性的土样坚向膨胀力下降16.7%。未改性和经过0.8%PVA+4%CaO的混合溶液改性的土样坚向膨胀力随着温度的升高而减小, 经过0.8%PVA+5%KCl的混合溶液改性, 并添加0.6%聚丙烯纤维后的土样随着温度升高坚向膨胀力先增加, 温度大于45℃后逐渐减小。

**关键词:** 强膨胀土; 膨胀力; 干密度; 温度; 复合溶液改性

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)04-0789-08

作者简介: 刘洪伏(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事水土力学与岩土工程相关科研。E-mail: 1573068861@qq.com。

## Experimental study on three-dimensional swelling pressure of highly expansive clay in Handan district of China

LIU Hong-fu<sup>1</sup>, WANG Shi-ji<sup>1</sup>, LI Xian<sup>1, 2</sup>, LIANG Guang-chuan<sup>1</sup>, SHEN Tai-yu<sup>1</sup>, HE Bing-hui<sup>2</sup>

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The three-dimensional swelling pressure tests on highly expansive soil are carried out under different dry densities, initial moisture contents and temperatures using composite modification methods. The results show that the ratio of vertical swelling pressure to horizontal swelling pressure increases with the increase of dry density in the range of test conditions (dry densities of 1.2, 1.35, 1.5 and 1.65 g/cm<sup>3</sup>, initial moisture contents of 15%, 18%, 21% and 24%, temperatures of 20℃, 35℃, 45℃, 55℃ and 65℃). The ratio is close to one when the dry density is 1.2 g/cm<sup>3</sup>. Moreover, the dry density is the key factor that determines the swelling pressure equilibrium time. The larger the dry density, the longer the equilibrium time. However, the swelling pressure equilibrium time of all samples is within 3000 minutes. The vertical swelling pressure of the expansive soil increases exponentially with the enlargement of the dry density at room temperature of 20℃ when the initial moisture contents are the same. Under the same temperatures and dry densities, the three-dimensional swelling pressures decrease linearly with the increase of the initial moisture content. Moreover, the slope of the relation curve increases linearly with the dry density. The vertical swelling pressure of the soil decreases by 33.3%, which is treated by 0.8% polyvinyl alcohol (PVA) with 5% potassium chloride (KCl) mixture solution and 0.6% polypropylene fiber, and that of the soil reduces by 16.7%, which is treated by 0.8% PVA with 4% lime (CaO) mixture solution. The vertical swelling pressure of the unmodified soil and the modified sample treated by 0.8% PVA with 4% CaO mixture solution decreases with the rise of the temperature. However, the vertical swelling pressure of the soil samples increases with the rise of temperature, and gradually decreases when the temperature exceeds 45℃ after modification by 0.8% PVA with 5% KCl mixed solution and 0.6% polypropylene fiber.

**Key words:** highly expansive soil; swelling pressure; dry density; temperature; compound solution improvement

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572262); 中央高校基本业务费专项资金项目(XDKJ2018AB003)

收稿日期: 2018-05-02

\*通讯作者 (Email: shjwang@swu.edu.cn)

## 0 引言

膨胀土是一种富含蒙脱石、伊利石等强亲水性矿物，具有明显胀缩性的多裂隙黏性土<sup>[1]</sup>。在自然状态下膨胀土地区的基础设施在长期的湿胀干缩和温度变化下会造成严重的破坏，因此，研究解决工程建设中膨胀土的胀缩问题就显得尤为重要。

膨胀土受到限制时，遇水将产生膨胀力，膨胀力是土遇水保持体积不变所需要的压力<sup>[2-3]</sup>。实际工程中，膨胀力是破坏基础设施的主要原因，研究膨胀力在不同条件下的变化，对膨胀土在工程中的应用具有指导作用。目前国内外的学者对于膨胀土的膨胀力特性方面有较多的研究，早期的研究大多数集中于一维状态下，考察单方向膨胀力的应力应变，以及探究单向压实制样中引起的各向异性，而土体在自然环境中处于三维状态，因此对土体进行三向膨胀力试验研究具有实际工程意义。谢云等<sup>[2]</sup>、池泽成等<sup>[3]</sup>对重塑膨胀土进行三向膨胀力试验，探讨膨胀力与干密度、含水率的关系。秦冰等<sup>[4-5]</sup>研究了 GMZ001 钠基膨润土的三向膨胀力特性及胀缩特性的影响因素。

温度对膨胀土膨胀特性影响方面的研究还较为罕见。较多的是针对高庙子膨润土的温度效应研究，得到温度对膨润土浸水后膨胀特性的影响，集中于热、水、力单方面性状研究，以及温度对强度的影响<sup>[6-9]</sup>。多场耦合条件下的特性研究尚显欠缺。

膨胀土化学改良方面有虞海珍等<sup>[10]</sup>采用 ESR 生态改良剂进行膨胀土化学改良试验研究，得出改良后的土体其各类强度指标都有提高；沈泰宇等<sup>[11]</sup>通过试验筛选降低膨胀率效果较好的化学复合剂，发现经过 0.8%PVA+5%KCl 的混合溶液改性，并添加 0.6%聚丙烯纤维改性后和 0.8%PVA+4%CaO 的混合溶液改性的土样自由膨胀率降低，抗剪强度提高。

本文利用三向膨胀仪研究邯郸强膨胀土在不同干密度、初始含水率、温度和通过化学复合试剂改性下的三向膨胀力变化及规律，探讨邯郸强膨胀土特性在各因素耦合作用下的影响并且分析其原因，为邯郸膨胀土在实际工程中的应用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验仪器

本次试验采用江苏永昌科教仪器制造有限公司的 SPY-1 型岩土三向膨胀仪，该仪器与计算机配套自动采集数据，可以测量热环境条件下试样的膨胀力，准确监测膨胀土试样的三向膨胀力。该仪器由试样箱和上下、左右、前后三套反力架，温度控制部件和试验

量测传感器组成。试样箱内部尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm，通过 3 组反力架对试样 3 个方向进行手动加载，温度控制系统为布置在仪器底活塞面板上的加热环，荷载传感器分别安装在 3 个反力架拉杆的横梁上。三向加载板设计有储水环，从底部注水后，首先充满 3 个方向加载板的储水环，并从顶部开始排水；然后，储水环中的水通过均匀分布的渗水孔，从 3 个方向均匀渗入土样中，从而保证了水分渗入土样的三向均匀性。试验仪器见图 1。

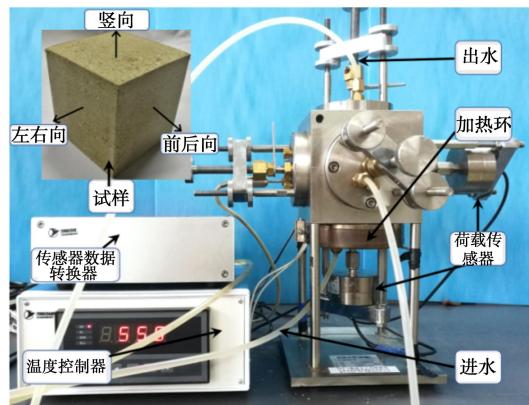


图 1 试验仪器

Fig. 1 Test instrument

### 1.2 试验材料

试验采用邯郸膨胀土，重塑制样。测得其基本物理力学性质见表 1。由于土样自由膨胀率大于 90%，因此判断其为强膨胀土<sup>[12]</sup>，塑性指标大，含有大量的蒙脱石、伊利石等矿物。

表 1 邯郸膨胀土基本物理指标

Table 1 Physical properties of Handan expansive soil

含水率 w%	颗粒相对密度 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指标 $I_p$	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$
13.4	2.75	81.9	47.3	34.5	130

### 1.3 试验方案

制样中，先将土样风干，人工碾压充分后过 2 mm 筛，然后将过筛后的土样烘干，配置试验所要的初始含水率，最后将配置好的土样密封放置润湿 24 h，通过制样器制样。按照设置好的 4 组初始含水率及 4 组干密度制备试样，膨胀试验中控制温度分别为 20℃、35℃、45℃、55℃、65℃。试验共进行了 16 个三向膨胀力试验，设置一组平行试验，试验先在常温下进行，待膨胀力稳定后控制温度增加，测定膨胀力变化，试验数据结果取两组的平均值，试验方案见表 2。

试验中，先将高水头水罐加满水，试样装入仪器，安装反力架，施加预应力使读数显示为 0.01 kN，让试样与连接荷载传感器的板紧密接触，在常温下，试验一直缓慢加水，试验过程中三向变形量限制为 0，计算机记录数据，当膨胀力读数变化 3 h 小于 0.01 kN 时

膨胀力在此温度达到稳定, 此时的膨胀力即为常温下试样的极限膨胀力, 然后增加试验温度, 从常温增加到35℃, 膨胀力稳定后依次加温度到45℃、55℃、65℃。

#### 1.4 土样改性试验方法

本文改性土样的化学复合试剂选用沈泰宇等<sup>[11]</sup>研究筛选的0.8%PVA+5%KCl的混合溶液并添加0.6%聚丙烯纤维和0.8%PVA+4%CaO的混合溶液两种。制样如1.3(试验方案)先碾压筛选2 mm土并烘干, 改性混合溶液的制备详见参考文献[11], 将烘干的土样与混合溶液按照5 g: 6 mL的比例浸泡24 h, 完成土样改性。在70℃下烘干, 再次人工碾压后过2 mm筛, 0.8%PVA+5%KCl混合溶液改性后的土样再按照0.6%的比例添加聚丙烯纤维, 将改性后的两种土样按照初始含水率18%, 干密度1.5 g/cm<sup>3</sup>进行制样。改性后的试样如1.3进行三向膨胀力试验。两种改性条件的试样都制备3个, 试验数据取均值见表2中的#17、#18。

表2 试验方案与结果

Table 2 Test schemes and results

编 号	w /%	$\rho_d$ $/(g \cdot cm^{-3})$	不同温度试验条件及竖向膨胀力/kPa				
			20℃	35℃	45℃	55℃	65℃
#1	15	1.20	25.00	25.00	25.00	18.75	12.50
#2	15	1.35	75.00	75.00	75.00	62.50	50.00
#3	15	1.50	256.25	218.75	206.25	193.75	175.00
#4	15	1.65	456.25	450.00	443.75	425.00	418.75
#5	18	1.20	25.00	25.00	25.00	18.75	12.50
#6	18	1.35	75.00	75.00	68.75	68.75	62.50
#7	18	1.50	187.50	187.50	187.50	181.25	175.00
#8	18	1.65	406.25	400.00	393.75	387.50	375.00
#9	21	1.20	18.75	18.75	18.75	12.50	6.25
#10	21	1.35	68.75	68.75	56.25	43.75	37.50
#11	21	1.50	156.20	156.25	156.25	143.75	137.50
#12	21	1.65	362.50	331.25	312.50	287.50	256.25
#13	24	1.20	18.75	18.75	18.75	18.75	12.50
#14	24	1.35	62.50	62.50	62.50	50.00	43.75
#15	24	1.50	150.00	150.00	150.00	143.75	131.25
#16	24	1.65	356.25	356.25	356.25	343.75	337.50
#17	18	1.50	125.00	146.88	153.13	146.88	140.63
#18	18	1.50	153.12	143.75	137.50	131.25	125.00

## 2 三向膨胀力试验结果分析

试验过程中为区分三向膨胀力, 规定平行于压实方向为竖向, 垂直于压实方向为左右向和前后向, 由于制样压实过程为单方向压实, 且干密度不同, 制样中可能导致材料各向异性, 模拟土体在自然沉积作用下产生的各向异性, 使得竖向膨胀力与左右向和前后向膨胀力的值不同, 竖向膨胀力将明显大于左右向和前后向膨胀力, 而左右向与前后向膨胀力基本相同。从初始含水率为21%, 干密度为1.65 g/cm<sup>3</sup>的典型三向膨胀力时程曲线中可以看出, 见图2。左右向和前后向膨胀力大致相同。为了便于陈述, 本次试验研究将以左右向与前后向膨胀力的平均值(以下称为水平

向膨胀力 $P_{sh}$ )和竖向膨胀力 $P_{sv}$ 作为研究分析对象。

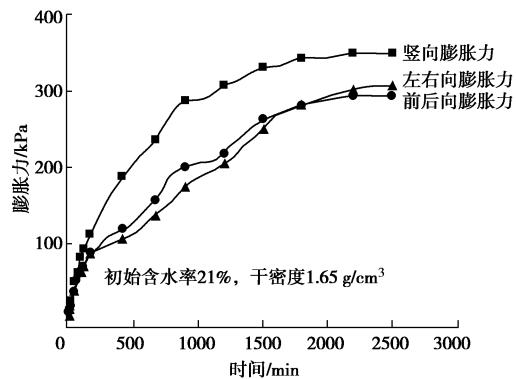


图2 典型三向膨胀力时程曲线

Fig. 2 Typical evolution of 3D swelling pressure

#### 2.1 竖向膨胀力与水平向膨胀力的关系

图3为不同初始含水率下, 竖向膨胀力与水平膨胀力之比与干密度的关系图。由图3可知, 竖向膨胀力与水平向膨胀力之比都大于1, 说明竖向膨胀力大于水平向膨胀力, 存在各向异性, 与推断一致。干密度小于1.2 g/cm<sup>3</sup>, 比值接近1, 说明干密度小的试样, 其竖向膨胀力与水平向膨胀力大致相同。

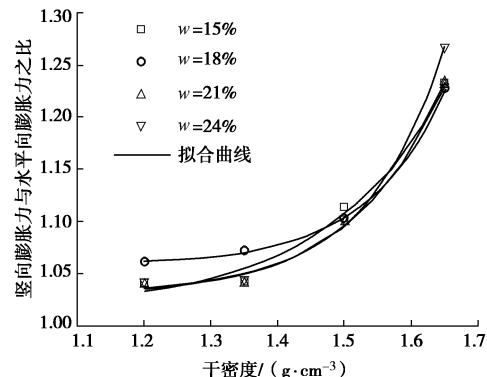


图3 竖向膨胀力和水平向膨胀力之比与干密度的关系图

Fig. 3 Ratio of horizontal to vertical swelling pressures as a

function of dry density

竖向膨胀力与水平向膨胀力的比值随着干密度和初始含水率的变化而改变, 说明干密度与初始含水率将影响试样的膨胀力; 同一干密度, 不同初始含水率下其比值差别不大, 表明初始含水率不是影响其比值变化的主要原因; 同一初始含水率下, 其比值随着干密度的增大而增加, 可知干密度是影响竖向与水平向膨胀力的主要因素。干密度越大, 其比值越大, 随着干密度的增加各向异性更明显。拟合其比值与干密度的关系式:

$$y = A + Be^{[\rho_d / (\rho_w C)]}, \quad (1)$$

式中,  $y$ 为竖向与水平向膨胀力的比值,  $\rho_d$ 为干密度(g/cm<sup>3</sup>),  $A$ ,  $B$ ,  $C$ 为参数, 取值见表3,  $\rho_w$ 为水的

密度( $1.0\text{ g/cm}^3$ )。

以晶格扩张理论分析<sup>[13]</sup>, 相同体积下, 干密度大的试样颗粒晶体更多, 孔隙较少, 晶格吸水膨胀产生的膨胀力更大; 而膨胀力各向异性的原因取决于蒙脱石叠片取向的各向异性<sup>[5]</sup>。当膨胀土倒入模具中时, 认为蒙脱石叠片方向是随机的。干密度较小, 团粒间存在较大的孔隙, 孔隙减少是由于颗粒间的滚动, 因此蒙脱石叠片方向也是随机的, 表现出的膨胀力各向异性不明显; 干密度较大, 团粒间孔隙小, 制样中竖向压力迫使蒙脱石叠片垂直于压实方向, 导致竖向膨胀力大于水平向膨胀力。在试验范围内, 使得竖向膨胀力与水平向膨胀力的比值随着干密度的增加而增加。

表3 竖向、水平向膨胀力比值与干密度拟合公式的参数

Table 3 Parameters of vertical to horizontal swelling pressures

ratio and formula for dry density

w/%	A	B/ $10^{-7}$	C/ $10^{-1}$	$R^2$
15	1.039	1.681	1.182	0.987
18	1.057	1.045	1.154	0.999
21	1.036	1.102	1.145	0.993
24	1.030	2.181	1.187	0.998

## 2.2 三向膨胀力随时间变化规律

不同初始含水率与干密度的试验组的三向膨胀力随着时间的变化规律大致相同, 常温下取竖向膨胀力的时程曲线分析, 如图4。

由图4可以看出, 在常温下竖向膨胀力的发展随着时间逐渐增加直到膨胀力稳定不变。不同初始含水率和干密度的试样膨胀力都经历快速增加到缓慢增加并趋于稳定的过程。由于试验前期膨胀土大量吸水, 而膨胀土中含有较多的蒙脱石、伊利石等亲水性矿物具有遇水膨胀的特性, 导致土体的膨胀势增加, 但由于土样3个方向的应变都受到限制, 膨胀势不能释放, 因此膨胀趋势转为膨胀力, 导致膨胀力快速增加, 前期的膨胀率显著增加。后期土体孔隙逐渐被水分充满, 土体亲水性矿物吸水饱和, 膨胀势逐渐减少, 膨胀力逐渐趋于稳定。

在常温下, 通过竖向膨胀力的时程变化, 可以看出前期膨胀率快速增加主要处于1000 min之前, 基本达到了极限膨胀力的80%, 后期缓慢增加趋于稳定主要集中于1000~2000 min, 膨胀力接近极限值, 膨胀力发展稳定都在3000 min内; 在本次试验研究干密度范围内, 干密度小于等于 $1.35\text{ g/cm}^3$ 时, 膨胀平衡时间较短, 一般在300 min内平衡。通过4组不同初始含水率的竖向膨胀力发展曲线, 可以看出, 当初始含水率相同时, 干密度越大, 达到膨胀力平衡的时间便

越长。对试样微观结构进行分析, 干密度较大时, 膨胀土内部土壤颗粒间孔隙小而细, 水分浸入土壤达到饱和则需要更多时间; 干密度较小时, 膨胀土中空隙多, 水分浸入土壤更加容易, 使得土壤内部物理性质发生迅速改变, 从而膨胀快速稳定; 由此可以看出, 干密度是决定膨胀时间的主要因素。左右向与前后向的膨胀力随着时间的变化大致与竖向膨胀力的变化一致, 其膨胀力也都在3000 min内稳定。

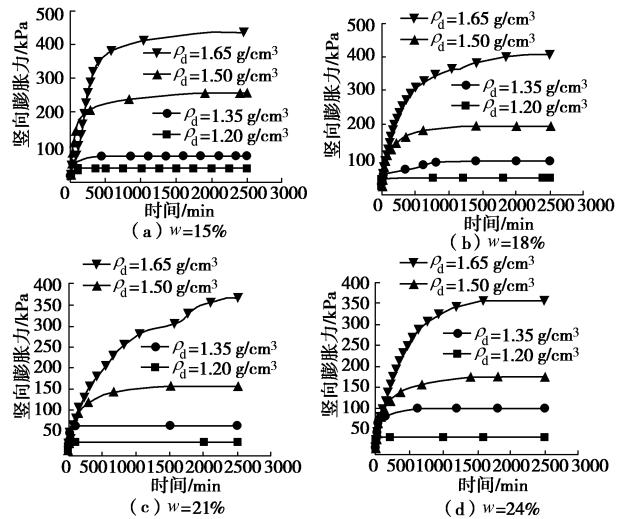
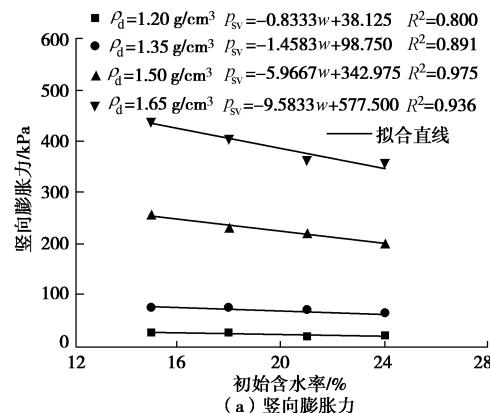


图4 竖向膨胀力时程曲线

Fig. 4 Curves of vertical swelling pressure and time

## 2.3 三向膨胀力与初始含水率的关系

图5为在常温、不同干密度下初始含水率与竖向膨胀力和水平向膨胀力的关系曲线。由图5可以看出, 同一干密度下, 竖向膨胀力和水平向膨胀力随着初始含水率的增大而减小; 干密度较大时, 现象更为明显, 干密度较小时, 含水率对膨胀力的影响较小。用晶格扩张理论分析<sup>[13]</sup>, 干密度相同时, 相同体积下颗粒晶体中的蒙脱石、伊利石等亲水性矿物含量大致相同。由于蒙脱石、伊利石等吸水能力一定, 当含水率较大, 试样本身便趋于饱和, 吸水膨胀便较弱; 当含水率较小, 试样大量吸水使膨胀力增加明显。



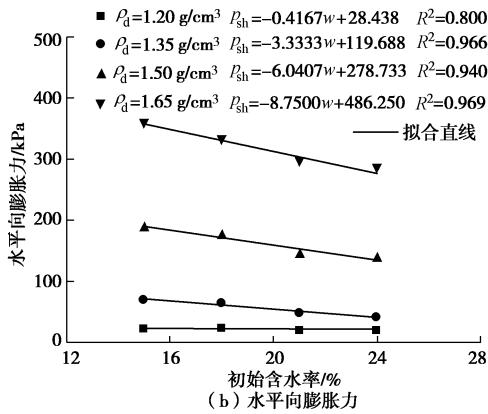


图 5 三向膨胀力 - 初始含水率关系曲线

Fig. 5 Relationship between initial water content and 3D swelling pressure

通过分析处理发现, 坚向膨胀力和水平向膨胀力与初始含水率之间存在线性关系, 对数据进行拟合, 可得回归分析式见图 5 标注,  $w$  为初始含水率 (%)。通过  $R^2$  可以发现干密度对相关性有影响, 干密度大于  $1.5 \text{ g/cm}^3$  时, 拟合模型与实际关系更接近。

根据拟合方程式, 将相同干密度的坚向膨胀力和水平向膨胀力的关于膨胀力与初始含水率的回归分析式斜率求平均值, 再做出此斜率平均值与干密度的关系图, 如图 6, 从图中可以看出, 干密度在  $1.2\sim1.65 \text{ g/cm}^3$  之间时, 干密度越大, 膨胀力随着初始含水率的变化率越大, 分析得出回归方程式为

$$k = 13.33 \rho_d / \rho_w - 15.48 \quad (R^2=98.37), \quad (2)$$

式中,  $k$  为膨胀力与初始含水率回归关系式的斜率,  $\rho_d$  为干密度 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_w$  为水的密度 ( $1.0 \text{ g/cm}^3$ )。

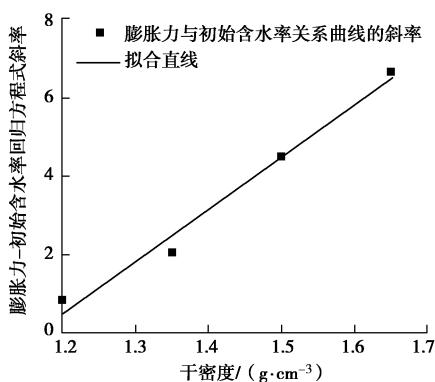


图 6 膨胀力与初始含水率回归方程斜率 - 干密度关系曲线

Fig. 6 Relation curve of slope of swelling pressure and initial moisture content regression equation and dry density

## 2.4 三向膨胀力与干密度的关系

图 7 为在常温下, 不同初始含水率的坚向膨胀力与干密度之间的关系曲线, 坚向膨胀力和水平向膨胀力与干密度的关系曲线大致一样, 本文以坚向膨胀力与干密度的关系曲线分析为例。从图可知, 干密度较

大, 膨胀力变化明显, 干密度较小, 膨胀力变化较弱; 晶格扩张理论分析<sup>[13]</sup>, 干密度较大, 单位体积颗粒晶体更多, 晶格吸水产生膨胀更为明显。

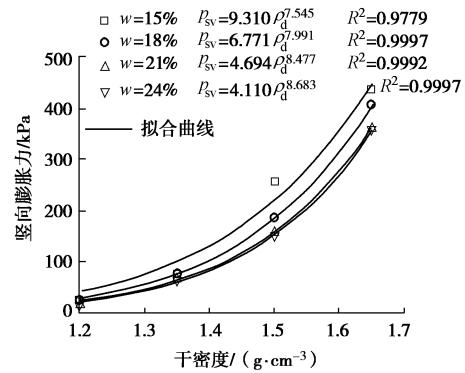


图 7 坚向膨胀力 - 干密度的关系曲线

Fig. 7 Relation curves of vertical swelling pressure and dry density

坚向膨胀力与干密度基本成指数关系。经过数据拟合, 函数关系式见图 7 中标注,  $\rho_d$  为干密度 ( $\text{g/cm}^3$ )。拟合曲线的  $R^2 > 0.97$ , 相关性显著。

## 2.5 三向膨胀力与温度的关系

以坚向膨胀力随着温度的变化数据进行分析, 图 8 是初始含水率不变, 不同干密度下温度与坚向膨胀力的关系曲线。通过曲线可以看出, 坚向膨胀力随着温度的变化与初始含水率及干密度都有关系, 温度在  $45^\circ\text{C}$  以下时, 干密度在  $1.2\sim1.5 \text{ g/cm}^3$  之间的试样膨胀力基本没有改变, 而干密度为  $1.65 \text{ g/cm}^3$  的试样坚向膨胀力随着温度的升高而逐渐减小; 温度大于  $45^\circ\text{C}$  时, 在所试验干密度范围内, 坚向膨胀力都随着温度的升高而下降。初始含水率不同, 坚向膨胀力随着温度的变化也有一定差别。

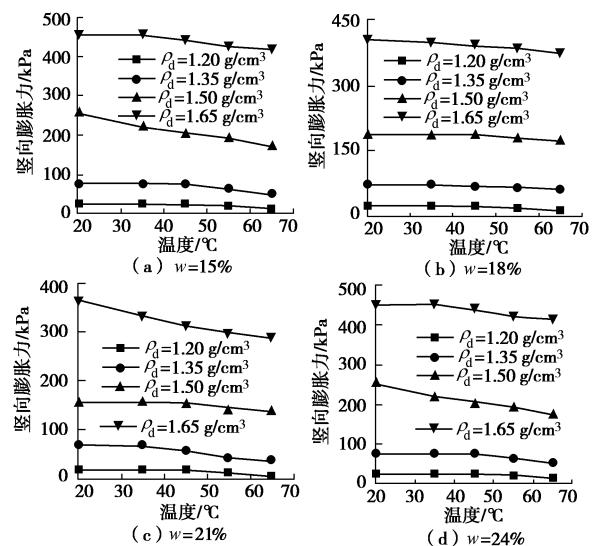


图 8 坚向膨胀力 - 温度关系曲线

Fig. 8 Curves of vertical swelling pressure and temperature  
邯郸膨胀土中含有丰富的蒙脱石等亲水性矿物,

浸水时形成大量吸附水，土颗粒表面间形成水合物，使得土体膨胀产生膨胀力。温度升高后，吸附水向自由水转移，土颗粒表面基本层间的水合作用降低导致水合物的减少，从而引起膨胀力的减弱。干密度小的试样内部土颗粒少空隙较大，土样比表面积较小，自由水较吸附水和水合物更多，因此，45℃以下温度的升高对膨胀力的影响较低；干密度大的试样内部土颗粒间密实，土样比表面积较大，吸附水与水合物较自由水更丰富，因此温度的改变导致膨胀力变化更显著。

Villar 等<sup>[9]</sup>、Romero 等<sup>[14]</sup>通过对膨润土的研究指出，膨润土浸水后的膨胀力随着温度的升高有所减小。与本文温度对膨胀力的研究结果一致。

### 3 土样改性试验结果分析

#### 3.1 改性前后膨胀特性比较

以竖向膨胀力为分析对象，图 9 为常温下，干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>，初始含水率为 18%，未改性土样、经过 0.8%PVA+4%CaO 的混合溶液改性的土样和经过 0.8%PVA+5%KCl 的混合溶液改性，并添加 0.6%聚丙烯纤维后的土样的膨胀时程曲线。经过改性后的土样膨胀力明显下降，且经过 0.8%PVA+5%KCl 的混合溶液改性，并添加 0.6%聚丙烯纤维后的土样较 0.8%PVA+4%CaO 的混合溶液改性的土样的竖向膨胀力降低更明显。通过表 2 的数据分析，经过 0.8%PVA+5%KCl 的混合溶液改性，并添加 0.6%聚丙烯纤维后的土样三向膨胀力为改性前三向膨胀力的 66.7%；经过 0.8%PVA+4%CaO 的混合溶液改性的土样为改性前三向膨胀力的 83.3%。

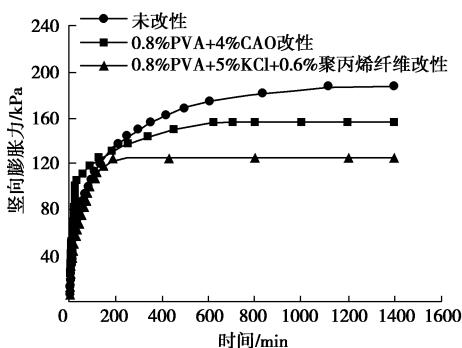


图 9 改性及未改性土样时程曲线

Fig. 9 Time curves of improved and unimproved soil samples

#### 3.2 温度对不同改性剂下膨胀土的影响

温度的增加对于膨胀土的三向特性有较大的影响，由 2.5 节可知，邯郸膨胀土的三向膨胀力在所研究温度范围内，随着温度的增加，膨胀力有减小的趋势，将改性后的土样也增加温度研究膨胀力的变化，得出温度对改性后膨胀土的相关作用。图 10 为温度对

改性前后土样竖向膨胀力的影响关系曲线。温度对不同改性剂的影响不同，经过 0.8%PVA+4%CaO 的混合溶液改性的土样随着温度增加，竖向膨胀力迅速下降，曲线大致呈线性关系，关系式为

$$P_{sv}/P_0 = -12.34 \times 10^{-2} T/T_0 + 1.63 \quad (R^2=0.999), \quad (3)$$

式中， $P_{sv}$  为竖向膨胀力 (kPa)， $P_0$  为标准大气压 101.3 kPa， $T$  为温度 (℃)， $T_0$  为室内常温 (20℃)。

经过 0.8%PVA+5%KCl 的混合溶液改性，并添加 0.6%聚丙烯纤维改性的土样在温度增加的同时竖向膨胀力也快速增加，当温度大于 45℃左右时，竖向膨胀力又随着温度增加而减小，但达到所研究温度范围 65℃时，竖向膨胀力较 20℃也增加 12.5%左右，经拟合，关系式为

$$P_{sv}/P_0 = 765.84 \times e^{\{-0.5 \times [(T/T_0 - 2.342)/51.34]^2\}} - 764.36 \quad (R^2=0.980) \quad (4)$$

由于聚丙烯纤维的熔点高达 165℃，因此本文试验中温度的升高对膨胀力的影响与聚丙烯纤维无关； $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 等阳离子置换出土颗粒表面的  $\text{Na}^+$ 等亲水金属阳离子，使得双电子层变薄，而 PVA 增加成膜性，达到隔离膨胀土颗粒与水分子的作用，亲水矿物吸水减少，都使得膨胀力有所降低。而温度的增加对于不同阳离子化合物溶液改性膨胀力效果的不同，考虑温度对添加  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  的土样作用不同造成的。

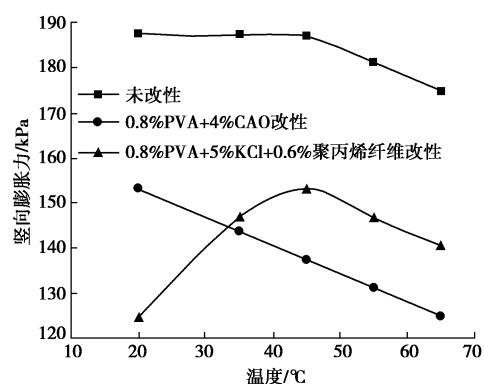


图 10 不同改性条件下竖向膨胀力-温度关系曲线

Fig. 10 Relation curves of vertical-swelling pressure and temperature under different improved conditions

温度升高对膨胀力的影响因素有：①双电子层排斥力增加，使膨胀力增加；②水合物减少，从而膨胀力减小。由试验数据可得 45℃是 2 种因素决定邯郸膨胀力大小的分界线。对添加  $\text{K}^+$  改性的土样，温度小于 45℃时，双电子层排斥增加的力大于水合物减少引起膨胀减小的力，从而使土样的膨胀力凸显为增加；当温度大于 45℃时，双电子层排斥增加的力小于水合物的减少导致膨胀减小的力，此时膨胀力凸显为减小。对添加  $\text{Ca}^{2+}$  改性的土样，改性后存在  $\text{Ca}^{2+}$  离子的颗粒

晶片的间距是添加  $K^+$ 改性后存在  $K^+$ 颗粒晶片间距的 2 倍<sup>[15]</sup>, 此时温度增加导致的双电层间的排斥力由于颗粒间距增大而表现相互作用力较小, 而水合物的减少导致膨胀力大大下降, 抵消双电层产生的膨胀力增加趋势, 使膨胀力凸显为下降。

## 4 结 论

(1) 竖向与水平向膨胀力的比值随着干密度的增加而增加, 与初始含水率的关系不大, 干密度增加使各向异性更显著; 三向膨胀力在 1000 min 前快速增加, 3000 min 内都达到平衡, 干密度越大, 平衡时间越长。

(2) 干密度不变, 三向膨胀力随着初始含水率的增加皆呈线性减少, 且减小幅度与干密度存在线性递增的关系。初始含水率不变, 竖向膨胀力与干密度基本成指数关系递增。

(3) 经过混合溶液改性后的土样竖向膨胀力都减小, 经过 0.8%PVA+5%KCl 的混合溶液改性, 并添加 0.6%聚丙烯纤维后的土样降低竖向膨胀力效果更好。

(4) 所研究温度范围内, 温度对干密度较大的未改性土样影响更加明显, 竖向膨胀力随着温度升高而下降。对经过 0.8%PVA+5%KCl 的混合溶液改性, 并添加 0.6%聚丙烯纤维后的土样, 温度增加, 竖向膨胀力先增加, 当温度大于 45°C 时, 膨胀力又逐渐减小; 经过 0.8%PVA+4%CaO 的混合溶液改性的土样随着温度的增加竖向膨胀力呈线性下降。

## 参考文献:

- [1] 杨果林, 滕珂, 秦朝辉. 膨胀土侧向膨胀力原位试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2326 - 2332. (YANG Guo-lin, TENG Ke, QING Zhao-hui. An in-situ experimental research of lateral swelling pressure on expansive soils[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7): 2326 - 2332. (in Chinese))
- [2] 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 remolded expansive clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1636 - 1642. (in Chinese))
- [3] 池泽成, 陈善雄, 周哲, 等. 合肥重塑膨胀土三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 381 - 386. (CHI Ze-cheng, CHEN Shan-xiong, ZHOU Zhe, et al. An experimental study of three-dimensional swelling pressure of Hefei remolded expansive clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 381 - 386. (in Chinese))
- [4] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1005 - 1010. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behaviour of Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1005 - 1010. (in Chinese))
- [5] 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, 2009, 31(5): 756 - 763. (in Chinese))
- [6] 蒋江红, 孙德安. 温度对高庙子膨润土浸水膨胀特性的影响[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2017, 23(5): 762 - 771. (JIANG Jiang-hong, SUN De-an. Influence of temperature on swelling characteristics of GMZ bentonite due to wetting[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2017, 23(5): 762 - 771. (in Chinese))
- [7] 李亚伟, 郭永海, 王驹. 膨润土性能温度效应研究进展[J]. 世界核地质科学, 2011, 28(2): 99 - 103. (LI Ya-wei, GUO Yong-hai, WANG Ju. Progress in the study of temperature effects on compacted bentonite[J]. World Nuclear Geoscience, 2011, 28(2): 99 - 103. (in Chinese))
- [8] 谢云, 陈正汉, 李刚. 温度对非饱和膨胀土抗剪强度和变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1082 - 1085. (XIE Yun, CHEN Zheng-han, LI Gang. Research of thermal effects on shear strength and deformation characteristics of unsaturated bentonite soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1082 - 1085. (in Chinese))
- [9] VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R, LLORET A. Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(1): 71 - 78.
- [10] 虞海珍, 李小青, 姚建伟. 膨胀土化学改良试验研究分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1941 - 1944. (YU Hai-zhen, LI Xiao-qing, YAO Jian-wei. Experimental study and analysis of expansive soil improved with chemical medicine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1941 - 1944. (in Chinese))

- Chinese))
- [11] 沈泰宇, 邢书香, 汪时机, 等. 降低强膨胀土膨胀率提高抗剪强度的复合改良剂筛选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 109 – 115. (SHEN Tai-yu, XING Shu-xiang, WANG Shi-ji, et al. Complex ameliorants screening for reducing swelling ratio and improving shear strength of strong expansive soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 109 – 115. (in Chinese))
- [12] 陈善雄, 余 颂, 孔令伟, 等. 膨胀土判别与分类方法探讨 [J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1895 – 1900. (CHEN Shan-xiong, YU Song, KONG Ling-wei, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1895 – 1900. (in Chinese))
- [13] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Special geotechnical engineering soil science[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [14] ROMERO E, VILLAR M V, LLORET A. Thermo-hydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays[J]. Engineering Geology, 2005, 81(3): 255 – 268.
- [15] 靳红敏, TOMA F A, KASS J, 等. 温度与无机盐阳离子对水化蒙脱土微观结构的影响[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 134 – 139. (JIN Hong-min, TOMA F A, KASS J, et al. Effects of inorganic salt and temperature on the micro-structure of hydrated montmorillonite[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(4): 134 – 139. (in Chinese))

### 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达咨询有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 上海分元土木工程有限公司