

文章编号: 1000-7598 (2014) 05-1275-09

不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀-压缩特性

周葆春, 张彦钧, 汤致松, 马全国, 冯冬冬, 梁维云

(信阳师范学院 土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘 要: 为探讨压实膨胀土的体变行为, 以荆门弱膨胀土为研究对象, 借助高压固结仪对 6 种制样压实度下的膨胀土试样进行了一维无荷载膨胀和含一次卸载一再加载循环的压缩试验。基于膨胀试验结果, 构建了膨胀时程方程, 通过参数分析, 明确了方程参数的物理意义, 并建议了膨胀时程曲线 3 阶段的划分方法。基于压缩试验结果, 探讨了固结屈服应力、压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 、膨胀力与制样压实度、土体结构性、膨胀势、孔隙比的相关关系。试验结果及其分析表明, 膨胀土体积变化是膨胀势与外部荷载、湿度变化的耦合作用结果, 且具有强烈的水-力路径依赖性。

关 键 词: 膨胀土; 压实; 体积变化机制; 膨胀势; 水-力路径; 膨胀时程曲线; 膨胀力; 固结屈服应力

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

One-dimensional swelling-compression characteristics of Jingmen weak expansive soil under different compactnesses

ZHOU Bao-chun, ZHANG Yan-jun, TANG Zhi-song, MA Quan-guo,
FENG Dong-dong, LIANG Wei-yun

(College of Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: In order to investigate the volume change behaviour of compacted expansive soil, the one-dimensional swelling-compression tests are carried out for Jingmen weak expansive soil associated with six different compactnesses. Based on the results of one-dimensional nonloaded swelling tests, a time-swelling formula is presented which can fit the tested time-swelling curve satisfactorily with the physically meaningful parameters. Furthermore, the time-swelling curve can be characterized as three segments divided by a method presented. On the other hand, the results of the one-dimensional compression tests are used to investigate the interactive relationship between consolidation yield stress, compression index C_c , swelling index C_s , swell pressure and sample compactness, soil structure, swelling potential, void ratio in detail. The test results show that the volume change of compacted expansive soil is the consequence of the effects coupled moisture, external load, and swelling potential. And the volume change depends heavily on the hydro-mechanical path.

Key words: expansive soil; compaction; volume change mechanism; swelling potential; hydro-mechanical path; time-swelling curve; swelling pressure; consolidation yield stress

1 引 言

膨胀土遇水膨胀软化、失水收缩干裂, 工程性质复杂多变且不易把握, 常造成膨胀土地区众多的岩土工程灾害, 因而被称作特殊土、问题土、灾害性土, 甚至被称作岩土工程中的癌症。膨胀性是膨胀土工程病害的主要根源之一^[1]。土体膨胀性的大小即膨胀势, 一般用膨胀力与膨胀率表征。膨胀土遇水膨胀受约束时, 表现为膨胀力; 膨胀未受约束

时, 表现为膨胀变形(用膨胀率表征); 遇水膨胀所受约束较小而不足以完全抑制土体膨胀时, 膨胀力与膨胀变形同时发生。膨胀势与土体的外部约束条件、排水条件、应力状态相互作用^[2], 表现为体变特征的复杂性。

目前, 对膨胀力与膨胀变形^[3-8]、膨胀时程^[9-10]已有较多研究, 膨胀势与水化状态、外部约束条件等因素的耦合效应亦有初步研究^[2, 11-12], 但研究不同压实度下膨胀土的体积变化受膨胀势、外部荷载、

收稿日期: 2013-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51009118); 河南省教育厅自然科学基金基础研究计划项目(No. 2011A560009); 信阳师范学院大学生科研基金重点项目(No. 2013-DXSZD-21)。

第一作者简介: 周葆春, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学性质与本构模拟方面的研究工作。E-mail: zhoubcxynu@163.com

湿度变化的耦合影响仍有必要。

为此,本文以荆门弱膨胀土为研究对象,在高压固结仪上对 6 种制样压实度下的膨胀土开展一维膨胀-压缩试验。基于试验结果,试图构建物理意义明确的膨胀时程方程,探讨固结屈服应力、压缩指数、回弹指数、膨胀力与制样压实度、土体结构性、膨胀势、孔隙比的相关关系规律。最后,在试验结果及其分析的基础上,提出膨胀土体变机制的一种解释:膨胀土体积变化是膨胀势与外部荷载、湿度变化的耦合作用结果,具有强烈的水-力路径依赖性。研究结果可加强对膨胀土体变特性的认识,并为压实膨胀土的工程应用提供可靠依据。

2 试验方案

为获得水-力耦合状况下不同制样压实度膨胀土的体变特征,在高压固结仪上对 6 种制样压实度(95%、90%、85%、80%、75%、70%)下的荆门弱膨胀土开展系统完整的一维膨胀-压缩试验。

2.1 试验土样

试验用土取自湖北荆门,为弱膨胀土,呈黄褐色、硬塑状态,含黑色铁锰结核,局部有白色填充物,其物性指标、矿物成分与颗粒组成参见文献[13];重型击实试验表明,其最优含水率为 15.5%,最大干密度为 1.86 g/cm^3 [13];该土样在塑性图上位于 A 线以上,液限 w_L 大于 40%,且小于 60%,符合弱膨胀土在塑性图上的分布特征[14]。

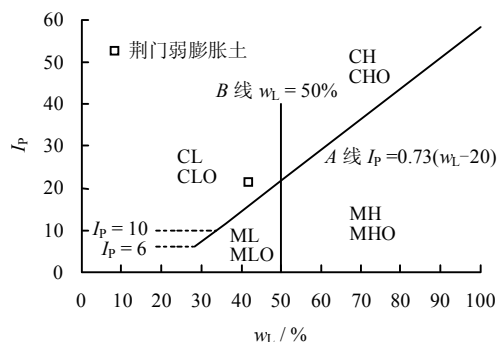


图 1 塑性图

Fig.1 Plasticity chart

试验采用直径为 61.8 mm、高度为 20 mm 的压实土样,制样控制指标见表 1。试样制备过程为:首先测定风干含水率(测得 $w = 7\%$),根据控制含水率计算加水量,每次取过 2 mm 筛的风干土 2 kg,平铺在不吸水的盘内,用喷雾器喷洒预计水量,静置 30 min,装入密封袋中,置于保湿缸内湿润 7 d。根据控制干密度计算所需湿土质量,将相应质量的

湿土倒入预先装好环刀的模具内(见图 2),抹平土样表面,以静压力将土压入环刀内。试样制备完成后,采用游标卡尺量测试样高度(量测 4 次,取均值),直径取 61.8 mm,获得制样体积。用保鲜膜包好试样,放入封口袋中,置于保湿缸中备用。

表 1 制样控制指标

Table 1 Controlling indices of sample preparation

控制压实度 /%	控制干密度 /(g/cm^3)	控制含水率 /%
95	1.77	17.0
90	1.67	17.0
85	1.58	17.0
80	1.49	17.0
75	1.40	17.0
70	1.30	17.0



图 2 制样工具与模具

Fig.2 Sampling apparatus and mould

2.2 一维无荷载膨胀试验

为探讨不同制样压实度下的膨胀特性,对 6 种压实度下的膨胀土样进行一维无荷载膨胀试验,即将压制完成后的试样置于固结容器中浸水饱和至体积不变为止,试验过程中监测各试样的膨胀变形。试验参照行业标准[15]中《无荷载膨胀率试验》方法执行,在南京土壤仪器厂有限公司生产的 WG 型单杠杆高压固结仪(见图 3)上完成,试样的稳定标准为隔 6 h 百分表读数不变。



图 3 高压固结仪

Fig.3 Oedometer apparatus

2.3 压缩试验

为获得不同制样压实度下该膨胀土的压缩特性，在高压固结仪上对完成一维无荷载膨胀试验的试样进行含一次卸载-再加载循环的压缩试验；压力等级为 12.5、25、50、100、200、400、200、100、50、100、200、400、800、1 600、3 200、4 000 kPa。试验参照行业标准[15]中《标准固结试验》方法执行，每级荷载下的稳定标准为 24 h。

3 试验结果分析

3.1 无荷载膨胀试验结果分析

3.1.1 试验结果

土样压制完成后的物性指标与体积参数见表 2；无荷载膨胀试验结果见表 3，表中膨胀率是指试样在有侧限条件下膨胀的增量与初始高度的比值；无荷载膨胀试验完成后的物性指标与体积参数见表 4。

表 2 制样完成后的物理指标与体积参数
Table 2 Physical properties and volume parameters after sample preparation

制样压实度 / %	高度 / mm	体积 / cm ³	质量 / g	实际压实度 / %	饱和度 / %	孔隙比
95	20.365	61.09	126.414	95.09	85.97	0.538
90	20.325	60.97	119.390	89.99	73.97	0.625
85	20.270	60.80	112.428	84.97	64.13	0.721
80	20.220	60.65	105.613	80.01	55.87	0.828
75	20.190	60.56	98.988	75.11	48.83	0.947
70	20.145	60.43	92.080	70.02	42.48	1.088

表 3 无荷载膨胀试验结果
Table 3 Results of non-loading swelling tests

历时 / min	不同压实度下的膨胀率/%					
	95%	90%	85%	80%	75%	70%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2.36	3.15	3.45	5.04	6.04	3.72
10	3.58	4.62	4.98	6.33	7.92	5.91
20	4.86	6.25	6.71	8.51	10.30	6.80
30	5.89	7.68	8.24	10.24	10.92	6.90
60	8.40	11.27	11.64	12.93	11.43	7.05
112	11.39	15.42	15.23	13.56	11.60	7.14
290	17.55	19.74	16.04	13.89	11.84	7.25
918	23.68	20.64	16.32	14.10	12.03	7.40
1 254	24.02	20.76	16.37	14.16	12.08	7.44
1 631	24.22	20.85	16.42	14.20	12.11	7.49
2 353	24.39	20.95	16.48	14.27	12.17	7.52
2 744	24.45	21.00	16.52	14.29	12.19	7.55
3 075	24.49	21.02	16.53	14.32	12.21	7.56
3 799	24.51	21.08	16.56	14.34	12.23	7.57
4 155	24.55	21.10	16.57	14.35	12.24	7.59
4 397	24.55	21.11	16.58	14.37	12.26	7.59
5 332	24.60	21.15	16.60	14.40	12.28	7.62
5 745	24.61	21.16	16.62	14.40	12.29	7.62

表 4 无荷载膨胀试验完成后的物理指标与体积参数
Table 4 Physical properties and volume parameters after non-loading swelling tests

制样压实度 / %	高度 / mm	体膨胀率 / %	孔隙比	膨胀含水率 / %
95	25.376	24.61	0.949	34.90
90	24.625	21.16	0.998	36.68
85	23.638	16.62	1.020	37.50
80	23.131	14.40	1.110	40.80
75	22.671	12.29	1.205	44.29
70	21.680	7.62	1.261	46.35

3.1.2 试验结果分析

根据表 3 绘制单对数坐标系内的膨胀率 δ_t -时间 t 关系（膨胀时程曲线）见图 4，可见：①即使土样相对疏松如压实度为 70% 的试样，也表现为湿胀；②制样压实度愈高，膨胀速率愈小，达到膨胀稳定时间愈长；③最终膨胀量（体膨胀率）随制样压实度的增大而增大；由表 4 可见，不同制样压实度试样湿化膨胀稳定后的孔隙比、含水率（膨胀含水率）的差异，这说明即使在无荷载条件下，压实膨胀土并非存在着一个惟一的饱和状态 (e, w) ，而是受到先期应力历史的影响，如文中的不同制样压实度。

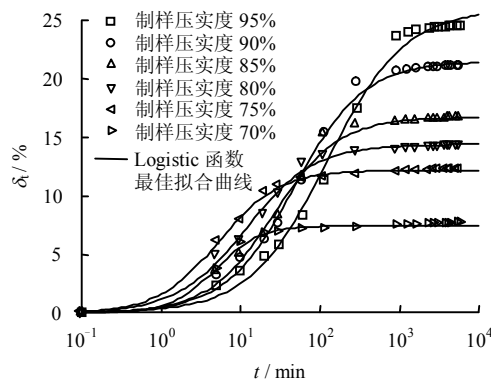


图 4 膨胀时程曲线
Fig.4 Time-swelling curves

此外，无论初始状态较为致密还是较为疏松，6 种压实度下单对数坐标系内的膨胀曲线均呈现为 S 型，可划分为初始膨胀段、加速膨胀段、缓慢膨胀段。这一点与袁俊平等^[9]所获枣阳膨胀土、李志清等^[10]所获蒙自膨胀土的膨胀时程曲线规律一致。袁俊平等^[9]采用分段线性函数、李志清等^[10]采用药物反应（does response）对数模型描述膨胀时程曲线均取得了较好的拟合效果，但上述方程尚未给出方程参数较为明确的物理意义。

在李志清等^[10]建议的对数模型基础上，经尝试，采用如式（1）的 3 参数 Logistic 函数描述膨胀

时程曲线可取得很好的拟合效果, 见图4与表5。

$$\delta_t = A_1 - \frac{A_1}{1 + (t/t_0)^p} \quad (1)$$

式中: δ_t 为 t 时刻的膨胀率(%); t 为时间(min), 是自变量; A_1 、 p 、 t_0 均为土性参数; 其中 A_1 为时程曲线的渐近线, 与体膨胀率(见表4)相近(%)。

图5是基于制样压实度为90%试样的试验结果(表3)与方程(1)的拟合结果(表5)对 p 、 t_0 所做的参数分析。图5清晰表明, p 为与加速膨胀段

表5 膨胀时程曲线方程参数

Table 5 Formula parameters of time-swelling curves

制样压实度 / %	A_1 / %	p	t_0 / min	R^2
95	25.98	0.887	121.77	0.995
90	21.48	0.993	46.66	0.995
85	16.72	1.064	25.37	0.992
80	14.41	1.016	11.50	0.993
75	12.18	1.151	5.23	0.998
70	7.47	1.574	4.82	0.993

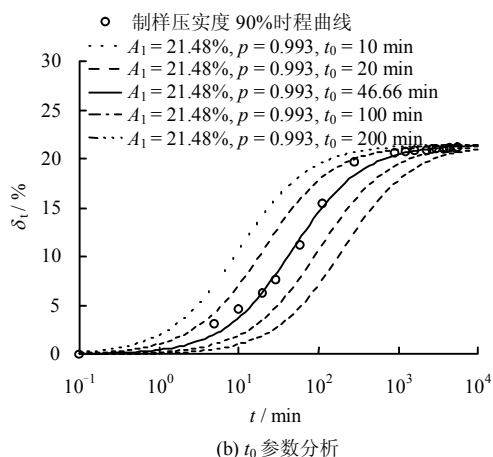
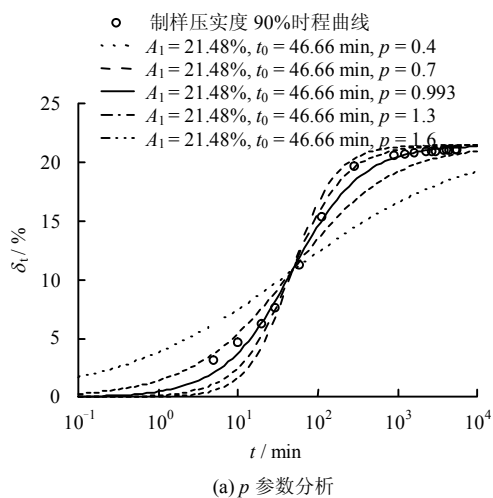


图5 膨胀时程曲线方程参数分析

Fig.5 Parameter analysis for formula of time-swelling curves

反弯点(斜率最大点)处斜率相关的土性参数, p 越大, 表明加速膨胀段的斜率越大, 膨胀愈快达到稳定; t_0 为与反弯点位置相关的土性参数(min), t_0 越大, 反弯点位置坐标值愈大, 膨胀达到稳定的时间较长。

对照表5与图4可见, A_1 与体膨胀率正相关, 且随制样压实度的增大而增大, 描述了体膨胀率随制样压实度增大而增大的规律; p 与加速膨胀段反弯点处斜率正相关, 且随制样压实度的增大而降低, 描述了制样压实度小的试样膨胀速率大、制样压实度大的试样膨胀速率小的规律; t_0 与反弯点位置正相关, 且随制样压实度增大而增大, 描述了制样压实度愈大的试样愈晚达到膨胀稳定的规律。以上分析表明, 式(1)能够很好地描述不同制样压实度下的膨胀时程规律, 且其参数具有明确的物理意义。

膨胀时程曲线可划分为3个阶段, 如图6所示, 划分方法为: ①采用式(1)对膨胀时程曲线进行最佳拟合; ②确定最佳拟合曲线上的反弯点, 绘制该点的切线; ③切线与时间轴的交点为特征点1; ④切线与时程曲线的渐近线的交点为特征点2; ⑤特征点1与2将时程曲线划分为: 初始膨胀段、加速膨胀段与缓慢膨胀段。由图6可见, 该方法可清晰明确地对膨胀时程曲线进行划分。理论上讲, 膨胀会随时间一直持续下去, 自由膨胀率是其上限。但对于实际工程而言, 缓慢膨胀段影响不大, 特征点2可视为一个分界。

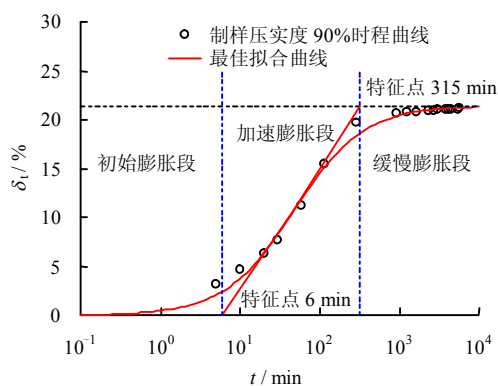


图6 膨胀时程曲线3阶段划分

Fig.6 Three segments of time-swelling curve

3.2 一维压缩试验结果分析

3.2.1 试验结果

6种制样压实度下膨胀稳定后的压缩试验结果见表6与图7, 图中 e 为孔隙比, σ'_v 为竖向有效应力。

3.2.2 固结屈服应力

由图7(b)可见: $e - \lg \sigma'_v$ 坐标系中, 压缩曲线发生明显转折, 体现出固结屈服应力 σ'_{vy} 的存在。

表6 一维压缩试验结果

Table 6 Results of one-dimensional compression tests

竖向有效应力 / kPa	不同制样压实度下的孔隙比					
	95%	90%	85%	80%	75%	70%
0.0	0.949	0.998	1.020	1.110	1.205	1.261
12.5	0.937	0.983	1.013	1.097	1.184	1.244
25.0	0.921	0.963	1.000	1.072	1.147	1.195
50.0	0.887	0.924	0.966	1.021	1.067	1.087
100.0	0.834	0.864	0.897	0.939	0.972	0.985
200.0	0.769	0.791	0.817	0.849	0.866	0.869
400.0	0.700	0.714	0.738	0.757	0.760	0.761
200.0	0.711	0.726	0.748	0.767	0.771	0.771
100.0	0.731	0.745	0.766	0.784	0.789	0.789
50.0	0.752	0.767	0.785	0.803	0.809	0.809
100.0	0.746	0.760	0.780	0.798	0.803	0.803
200.0	0.729	0.742	0.763	0.782	0.786	0.786
400.0	0.697	0.710	0.732	0.750	0.752	0.752
800.0	0.628	0.641	0.657	0.666	0.662	0.664
1 600.0	0.567	0.577	0.587	0.590	0.585	0.587
3 200.0	0.503	0.509	0.517	0.514	0.510	0.511
4 000.0	0.485	0.490	0.497	0.493	0.489	0.490

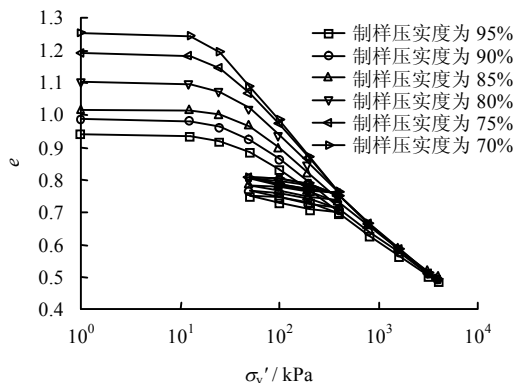
分析 σ'_{vy} 产生的原因：试样湿化饱和至稳定状态后，膨胀潜势完全释放，一旦受压， σ'_v 增大， e 减小，仍然会产生膨胀势。由于试样受约束产生膨胀力，此膨胀力抵消了部分 σ'_v ，从而增大了土体的刚度，致使 $e - \lg \sigma'_v$ 曲线的前半段斜率较小；随着 σ'_v 的继续增大，膨胀势被抑制，试样具有更大的压缩性，致使 $e - \lg \sigma'_v$ 曲线的后半段斜率较大，其转折点即为 σ'_{vy} 。

本文采用双对数坐标方法确定 σ'_{vy} ，即在 $\ln v - \lg \sigma'_v$ 坐标系中（比容 $v = 1 + e$ ）固结屈服应力由双直线的交点确定^[16]。图8表明， $\ln v - \lg \sigma'_v$ 坐标系中6条压缩曲线均可用两直线准确描述，且 σ'_{vy} 与制样压实度正相关，即制样压实度大的试样具有更高的 σ'_{vy} 。其原因可用压缩过程中产生的膨胀力与压实过程中产生的土体结构性来解释，即一方面，制样压实度大的试样具有更强的压实过程中产生的土体结构性；另一方面，制样压实度大的试样具有较小的压缩前孔隙比（见表7），土样受压后，再次产生的膨胀潜势相对较大，膨胀受约束产生的膨胀力也越大，导致其 σ'_{vy} 较大。

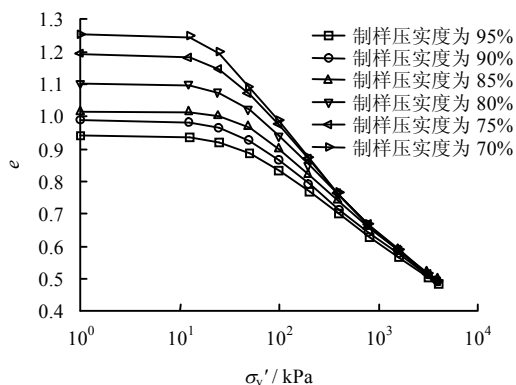
3.2.3 压缩指数

由图7(b)可见， $e - \lg \sigma'_v$ 坐标系中6种制样压实度下的压缩曲线后半段（ $\sigma'_v = 100 \sim 4\,000$ kPa 区间内）均呈现为直线段，且其斜率存在着较大差异，制样压实度大的试样斜率较为平缓，表明其压缩性低，制样压实度小的试样斜率较为陡峭，表明其压缩性高；该直线段的斜率即为压缩指数 C_c ，相应数

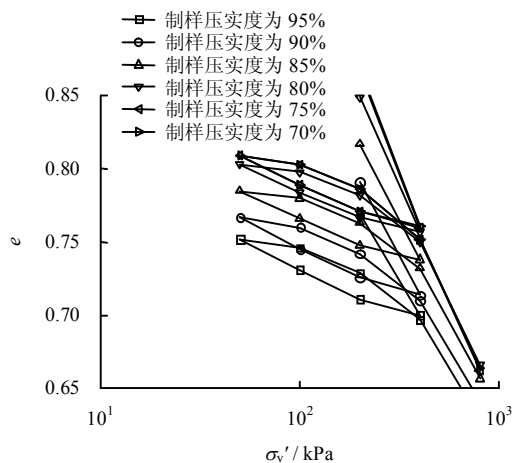
值见表7。



(a) 完整的压缩曲线



(b) 不含滞回环的压缩曲线



(c) 卸载-再加载滞回环

图7 一维压缩曲线

Fig.7 One-dimensional compression curves

此外，当 σ'_v 达到 4 000 kPa 时，6 种制样压实度下的试样会趋于一个稳定的孔隙比，其值在 0.49 左右（见表6），高于该土样最大干密度对应的孔隙比 0.462（相应含水率为 15.5 %）。试验结果表明，对于该饱和膨胀土而言，此最终孔隙比 0.49 可视为与试样的初始状态无关。

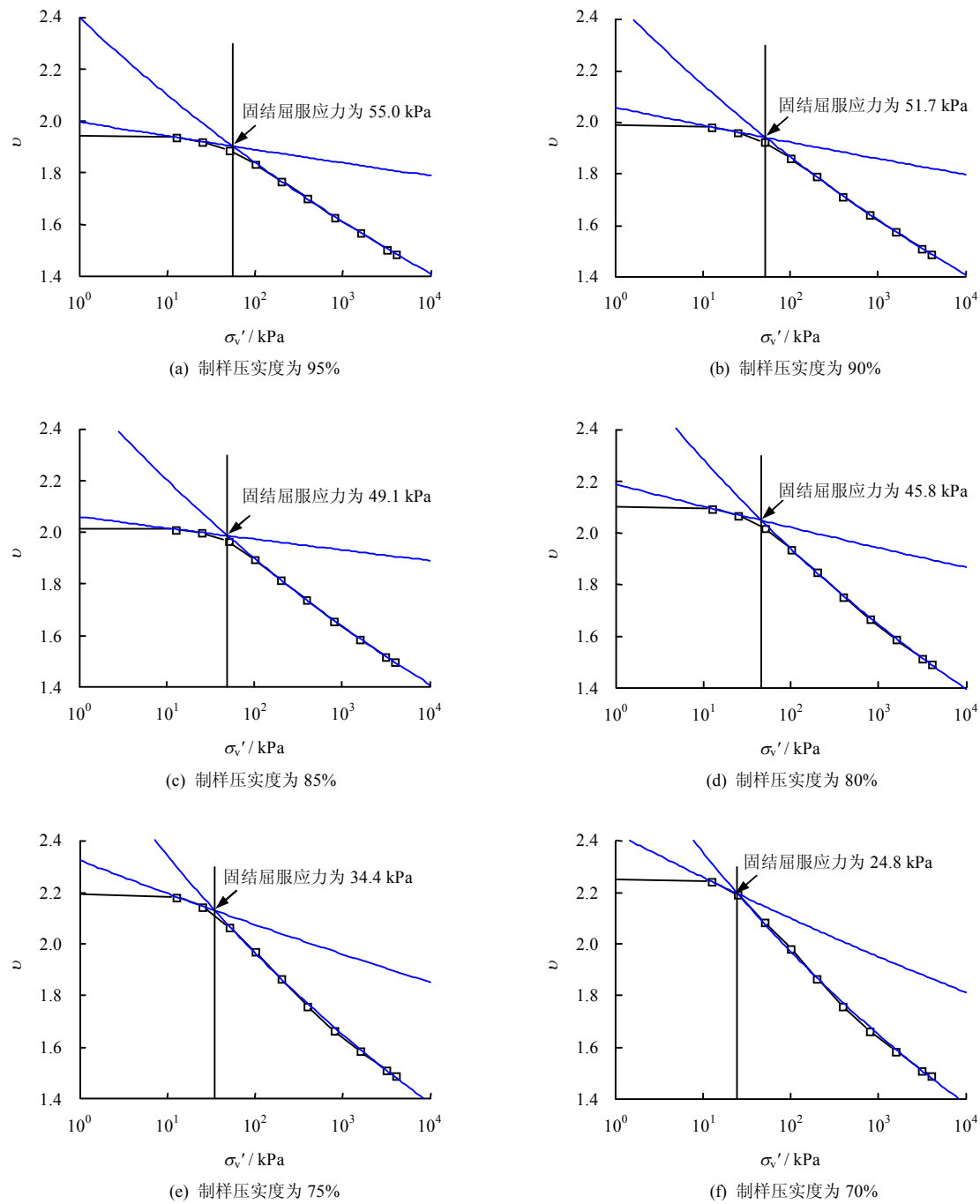


图 8 固结屈服应力
Fig.8 Consolidation yield stress

表 7 固结屈服应力、压缩指数、回弹指数与膨胀力
Table 7 Values of consolidation yield stress, compression index, swelling index and swelling pressure

制样 压实度 /%	压缩前 孔隙比	固结屈服 应力 /kPa	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s	C_s/C_c	膨胀力 /kPa
95	0.949	55.0	0.219 3	0.058 6	0.267	1 662.5
90	0.998	51.7	0.233 9	0.059 3	0.254	754.4
85	1.020	49.1	0.250 0	0.052 6	0.210	427.7
80	1.110	45.8	0.279 0	0.051 9	0.186	209.3
75	1.205	34.4	0.299 9	0.055 0	0.183	107.7
70	1.261	24.8	0.305 4	0.053 3	0.175	46.9

3.2.4 回弹指数

图 7(c)为压缩曲线从 400 kPa 卸载-再加载滞回环,其卸载段的斜率(回弹指数 C_s)表示回弹膨胀性的大小。由图可见,6 种制样压实度下试样的卸载段斜率差别不大,在 0.051 9~0.059 3 之间(见表 7),其数值大小与制样压实度无规律性关系。

由表 7 同时可看出, C_s/C_c 值在 0.175~0.267 之间,且随制样压实度的增大而增大,表明制样压实度大的试样回弹膨胀量相对较大。

压实膨胀土的回弹膨胀性受应力历史、结构性

与膨胀势的影响。文中试样从 400 kPa 卸载, 400 kPa 对应的孔隙比在 0.700~0.761 之间(见表 6), 差别不大, 因此, 其 C_s 差别不大。试样从更高或更低的竖向有效应力下卸载后的回弹膨胀性有待进一步研究。

3.3 一维膨胀-压缩特性探讨

3.3.1 膨胀力

膨胀土遇水膨胀受约束, 便会产生膨胀力 P_e , 其测试方法主要有膨胀-反压法与恒体积法。文中通过一维膨胀-压缩试验获得的膨胀率-竖向有效应力关系见图 9, 取各曲线与竖向有效应力轴的交点为膨胀力, 各制样压实度下的膨胀力见表 7。将膨胀力与相应制样孔隙比绘制在图 10 中, 同时绘制由恒体积法获得的该压实膨胀土的膨胀力-孔隙比关系^[17]。

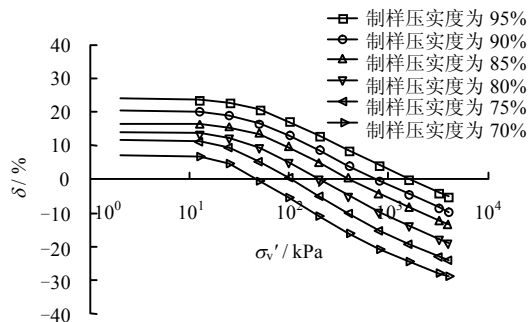


图 9 膨胀率-竖向有效应力关系

Fig.9 Relationships of swelling percentage and vertical effective stress

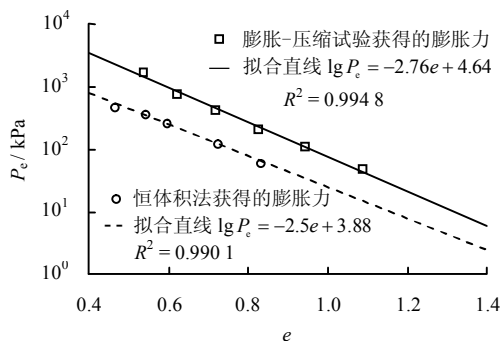


图 10 膨胀力-孔隙比关系

Fig.10 Relationships of swelling pressure and void ratio

由图 10 可见, 一维膨胀-压缩试验与恒体积法获得的 $\lg P_e - e$ 关系均呈良好的直线关系, 且二者大体平行。一维膨胀-压缩试验获得的膨胀力明显大于相应孔隙比条件下恒体积法获得的膨胀力。分析其原因, 恒体积法是保持体积不变条件下浸水, 试验过程中孔隙比不变; 膨胀-反压法在浸水膨胀过程中孔隙比增大, 相对恒体积法, 有更多的水进入土孔

隙, 再压缩至初始孔隙比, 势必需要更大的压力将多余(相对于恒体积法)的孔隙水挤出以达到膨胀前的孔隙比状态。

3.3.2 体变特性

土体体积变化可用孔隙比变化表征。图 11 为一维膨胀-压缩试验过程中的孔隙比变化, 可见不同制样压实度下试样无荷载膨胀稳定后并非达到一个唯一的孔隙比状态, 而与初始孔隙比相关, 即先期应力历史的影响; 膨胀稳定后压缩至 4 000 kPa 下各试样方达到一个唯一的孔隙比状态(0.49 左右), 这个状态是外部荷载(4 000 kPa)远远超越最大膨胀力(1 662.5 kPa)所致。

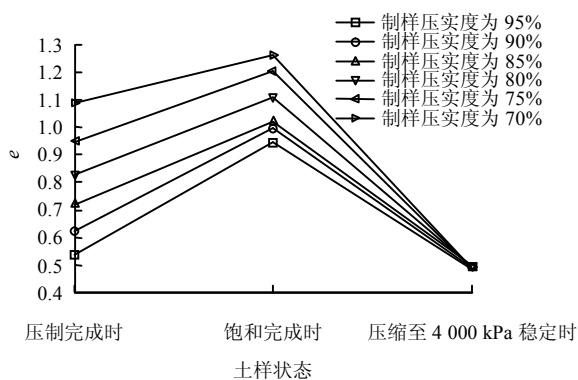


图 11 一维膨胀-压缩试验过程中的孔隙比变化

Fig.11 Void ratio changes during the whole test process

整个浸水膨胀-压缩过程中, 不同制样压实度试样的孔隙比状态不同, 膨胀势亦不同, 膨胀势与外部荷载相互作用, 造成其固结屈服应力、压缩指数、回弹指数、膨胀力等体变特性指标的差异性。

膨胀土体变机制可用图 12 解释, 图中 SP 为膨胀势 (swelling potential), p_1 、 p_2 代表外部荷载的影响 (加/卸载), Δw 代表湿度变化 (脱/吸湿), e_i 、 w_i 、 SP_i 分别代表孔隙比、含水率、膨胀势状态。

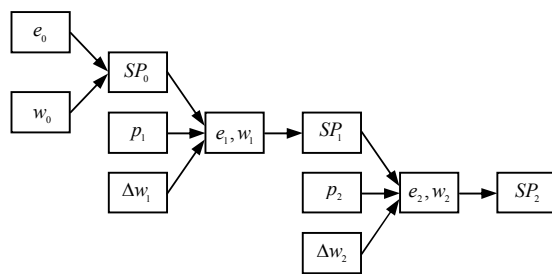


图 12 膨胀土体积变化机制示意图

Fig.12 Sketch map of volume change mechanism for expansive soil

图 12 中, 初始孔隙比状态和持水状态(e_0, w_0)

决定了初始膨胀势 SP_0 的大小;第1级水-力作用下,外部荷载 p_1 、湿度变化 Δw_1 、膨胀势 SP_0 三者共同作用稳定后,土体达到平衡状态(e_1, w_1),该状态对应一个新的膨胀势 SP_1 ;第2级水-力作用下, p_2 、 Δw_2 、 SP_1 又相互作用,土体达到第2个平衡状态(e_2, w_2);当然,第2个平衡状态(e_2, w_2)又对应着一个新的膨胀势 SP_2 。该机制可直观解释图11中6种制样压实度下的浸水膨胀与压缩过程中的孔隙比差别(体变差别)。

此外,膨胀土的体积变化与水-力路径相关,先加水还是先加力,抑或是水、力同时施加,会造成其体积变化的差别,其根源在于膨胀势与外部荷载、湿度变化的耦合作用。图10中先浸水后压缩(膨胀-反压法)与浸水同时施加压力(恒体积法)路径上相同孔隙比下膨胀力的显著差别,说明水-力路径的差别会直接影响膨胀势的大小,进而影响土体的体积变化。

综上所述,膨胀土体积变化是膨胀势与外部荷载、湿度变化的耦合作用结果,且具有强烈的水-力路径依赖性。这是膨胀土体变特征复杂性的根源之一。因此,在实际工程中预测膨胀力抑或膨胀变形时,需依据具体工况的水-力路径选取相应土性参数进行分析计算。

4 结 论

(1) 即使是在无荷载条件下,压实膨胀土并非存在着一个惟一的饱和状态(e, w),而是受先期应力历史的影响。本文建议的3参数 Logistic 函数可很好地描述膨胀时程曲线;参数分析表明,各参数均具有明确的物理意义。膨胀时程曲线可用文中建议的方法划分为初始膨胀段、加速膨胀段与缓慢膨胀段。

(2) 6种制样压实度下弱膨胀土膨胀稳定后的压缩曲线均显示出固结屈服应力的存在,且可用双对数坐标法准确确定。制样压实度大的试样具有更高的固结屈服应力。其原因是制样压实度大的试样具有更强的压实过程中产生的土体结构性和较小的压缩前孔隙比;土样受压后膨胀势相对较大,导致其固结屈服应力较大。

(3) 制样压实度大的试样压缩指数较小,表明其压缩性较低。6种制样压实度下的回弹指数差别不大。回弹指数大小与卸载点对应的孔隙比相关。

(4) 当竖向有效应力达到4000 kPa时,6种制样压实度下的试样会趋于一个稳定的孔隙比,其值在0.49左右,这个孔隙比可视为与试样的初始状态无关。

(5) $\lg P_e - e$ 坐标系中一维膨胀-压缩试验获得的膨胀力-孔隙比关系与恒体积法获得的膨胀力-孔隙比均呈良好的直线关系,且大体平行。一维膨胀-压缩试验获得的膨胀力明显大于相应孔隙比条件下恒体积法获得的膨胀力。

(6) 对试验结果的分析表明,膨胀土体积变化是膨胀势与外部荷载、湿度变化的耦合作用结果,且具有强烈的水-力路径依赖性。这是膨胀土体变特征复杂性的根源之一。在实际工程中预测膨胀力抑或膨胀变形时,需依据具体工况的水-力路径选取相应土性参数进行分析计算。

以上结论基于相同初始含水率的一维膨胀-压缩试验结果,对于不同初始含水率下的情况尚待进一步研究。

致谢: 中国科学院武汉岩土力学研究所特殊土力学课题组提供了膨胀土样,华中科技大学土木工程与力学学院胡亮博士对本文提出了修改意见,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141—161.
KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slope[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(5): 141—161.
- [2] 周葆春, 孔令伟, 郭爱国. 不同水化状态下的压实膨胀土应力-应变-强度特征[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 641—652.
ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Stress-strain-strength behaviour of compacted expansive soil under different hydration states[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 641—652.
- [3] 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 Lou-rong, KONG Ling-wei. Study of variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1555—1559.
- [4] 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.
DING Zhen-zhou, ZHENG Ying-ren, LI Li-sheng. Trial study of variation regularity of swelling force[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1328—1332.
- [5] 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.
- [6] 张福海, 王保田, 刘汉龙. 压实膨胀土路基的膨胀变形规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 206—210.
- ZHANG Fu-hai, WANG Bao-tian, LIU Han-long. Research on deformation disciplines of compacted expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 206—210.
- [7] 贾景超, 杨庆. Gouy-Chapman 双电层模型在蒙脱石长程膨胀中应用[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(2): 239—244.
- JIA Jing-chao, YANG Qing. Application of Gouy-Chapman double layer model to long-range swelling of montmorillonite[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2010, 50(2): 239—244.
- [8] 项伟, 董晓娟. 南水北调滹王坟段弱膨胀土膨胀性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 986—992.
- XIANG Wei, DONG Xiao-juan. Study of swelling characteristic of the weak expansive soil in Luwangfen for South-to-North Water Diversion Project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 986—992.
- [9] 袁俊平, 陈剑. 膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 547—551.
- YUAN Jun-ping, CHEN Jian. Experimental research on swelling characteristics of expansive soil under one-side immersion and its application[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2003, 31(5): 547—551.
- [10] 李志清, 李涛, 胡瑞林, 等. 蒙自重塑膨胀土膨胀变形特性与施工控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1855—1860.
- LI Zhi-qing, LI Tao, HU Rui-lin, et al. Expansion characteristics and construction control of remolded Mengzi expansive soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(12): 1855—1860.
- [11] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732.
- KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability and its mechanical effect of Jingmen expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 727—732.
- [12] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑水化状态影响的膨胀土强度特性[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3193—3198.
- LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength characteristics of expansive soil considering effect of hydrous state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3193—3198.
- [13] 孔令伟, 周葆春, 白颢, 等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3036—3042.
- KONG Ling-wei, ZHOU Bao-chun, BAI Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3036—3042.
- [14] 李生林, 薄遵昭, 秦素娟, 等. 塑性图在判别膨胀土中的应用[J]. 地质论评, 1984, 30(4): 352—356.
- LI Sheng-lin, BO Zun-zhao, QIN Su-juan, et al. Application of plasticity chart in distinguishing swelling soil[J]. **Geological Review**, 1984, 30(4): 352—356.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [16] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils (an advance on e -lg p') [J]. **Geotechnique**, 1979, 29(4): 469—480.
- [17] 周葆春, 孔令伟, 郭爱国. 荆门弱膨胀土的胀缩与渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 424—429.
- ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Experimental study of swelling-shrinkage behaviour and permeability characteristics of Jingmen weak expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 424—429.