

辽西地区风积土结构特性试验研究

张向东, 刘功勋, 于 崇, 孙国志

(辽宁工程技术大学 土木建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 在一系列室内固结试验的基础上, 探讨了风积土的固结与结构特性。试验结果表明, 风积土在不同状态下表现出不同的压缩性, 主要反映在 $e-p$ 压缩曲线上。风积土的 $e-\lg t$ 关系曲线与饱和黏土明显不同, 主要是因为它们的微观结构和结构性不同。同时, 固结系数和固结压力有较好的相关性。此外, 比较阜新与其他地区的土体, 说明其具有特殊的结构性。

关 键 词: 风积土; 压缩性; 固结系数; 固结压力; 结构性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Testing study on structural character of aeolian soil in western area of Liaoning Province

ZHANG Xiang-dong, LIU Gong-xun, YU Chong, SUN Guo-zhi

(Institute of Civil Engineering & Architecture, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Based on a series of laboratory consolidation tests, the consolidation behavior and structural character of aeolian soil are discussed. The tests show that the aeolian soil represent different compressibilities in different variant conditions; it reflects mainly in $e-p$ compression curve. The $e-\lg t$ curve is different obviously from saturated clay; it mainly because they have different microstructure and structural character. At the same time, there is a significant correlativity between the coefficient of consolidation and the consolidation pressure. Furthermore, it shows that the aeolian soil has special structural character by comparing the soil in Fuxin with the soil in other areas.

Key words: aeolian soil; compressibility; coefficient of consolidation; consolidation pressure; structural character

1 引 言

土体的结构性, 是指土体颗粒和孔隙的性状和排列形式(或称组构)及颗粒之间的相互作用。绝大多数天然土都有一定的结构性^[1], 近年来的研究成果表明, 土体的宏观力学性质与其结构性密不可分。从内因上来说, 土体的初始结构性会导致在各向异性、固结系数和渗透系数方面的显著差异; 从外因上来说, 如应力作用过程、路径和水平、冻融循环等, 可以改变土本身的结构, 形成次生结构, 使同一种土在不同应力状态下具有不同的力学性质。因此, 土的结构性对土的工程性质有强烈的影响^[2]。早在 1925 年, 太沙基就指出土结构性研究的重要性, 沈珠江称之为“21 世纪土力学的核心”, 不难看出, 土结构性在土力学学科发展中的独特

地位。

风积土是由风作为搬运动力, 将碎屑物由风力强的地方搬运到风力弱的地方沉积下来的土。风积土主要分布在沙漠边缘的干旱与半干旱气候带。其广泛存在于我国的东北、内蒙古、西北等地区。它们往往构成各类工程建筑物的地基持力层, 并广泛应用于公路、铁路等建设项目中。而其又具有一些特殊的工程性质, 譬如具有特殊的主、次固结特性与结构性等, 所以对其展开深入的研究具有十分重要的实践意义和理论意义。

2 风积土的基本物理特性

土样取自辽宁阜新地区, 天然含水率为 17.7%, 不含有机质。为了保证所取土样的均匀性, 钻孔取样时取土器位于同一土层。本次试验取土深度为

1.5 m。风积土原状土物理力学性质指标见表 1，其方法及具体试验步骤见文献[3]。

表 1 风积土原状土物理力学性质表
Table 1 Physico-mechanical properties of undisturbed aeolian soil

天然 含水率 $\omega / \%$	天然 密度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	土粒 比重 G_s	饱和度 S_r	孔隙比 e	可塑性			液性 指数 I_L
					液限 $\omega_L / \%$	塑限 $\omega_P / \%$	塑性 指数 I_P	
17.70	1.82	2.70	95.43	0.75	28.65	12.93	15.72	0.30

3 试验仪器与试样准备

本次试验采用的主要设备为 WG 型单杠杆固结仪，结构形式为三联高压，如图 1 所示。固结压力分别采用 25, 50, 100, 200, 300, 400, 800 kPa。试样截面面积为 30 cm^2 ，土样高度为 2 cm。原状土用薄壁取土器从现场取样，然后用环刀从取土器中精心切取；重塑土先将原状土烘干，然后碾碎过筛、称重、测出烘干含水率，按含水率的要求计算所需加水量，用量筒量取，并将水均匀喷洒于土样上，充分拌匀后装入盛土容器内盖紧，润湿一昼夜；饱和土样的制备采用框式饱和器，在装有原状土试样的环刀上、下面分别放滤纸和透水板，装入饱和器内，并通过框架两端的螺丝将透水板、环刀夹紧，然后将装好的饱和器放入水箱内，注入清水（水面不宜将试样淹没，以使土中气体得以排出），浸水时间为两昼夜。

试验的荷载是逐级施加的，每加一级荷载，要等到压缩相对稳定后再施加下级荷载，本试验每级荷载稳定时间为 24 h。



图 1 单杠杆固结仪

Fig.1 The simple lever consolidation apparatus

4 试验结果与分析

4.1 孔隙比变化规律

根据试验结果，绘制不同状态下风积土的 $e-p$ 曲线如图 2 所示。

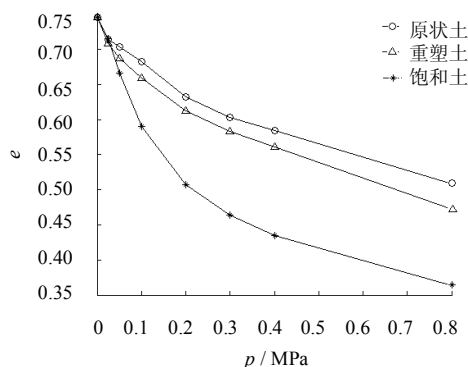


图 2 不同状态下风积土的 $e-p$ 曲线图

Fig.2 The $e-p$ curves of aeolian soil in different behaviours

从图 2 中可以看出：

(1) 对应于同一压力，原状土的孔隙比最大，重塑土的孔隙比次之，而饱和土的孔隙比最小。

(2) 由压缩系数计算公式 $a = \tan \alpha = -\frac{\Delta e}{\Delta p}$

$\frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1}$ (e_i 为某一荷载下压缩稳定后的孔隙比； p_i

为某一荷载值(kPa))，算出不同状态下风积土的压缩系数 a_{1-2} ($p_1 = 100 \text{ kPa}$ 至 $p_2 = 200 \text{ kPa}$ 时对应的压缩系数) 得：原状土压缩系数为 $a_{1-2} = 4.6 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ ；重塑土压缩系数为 $a_{1-2} = 5.0 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ ；饱和土压缩系数为 $a_{1-2} = 8.3 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ ，说明原状土的压缩性最小，饱和土压缩性最大。这主要因为原状土未受到扰动，土颗粒的排列和联结并未受到破坏，而重塑土的原始结构已经受到破坏，所以其压缩性比原状土要大，这也是风积土具有明显结构性的宏观反映。对于饱和土，在固结前期，外界压力主要由超孔隙水承担，水的排出比较快，所以压缩性比较大，而到了固结后期，随着超孔隙水的排出，外界压力逐渐由土骨架及其联结所承担，因此，其压缩性与原状土和重塑土基本相当。

4.2 主、次固结变形特性分析

百分表在不同压力下各时刻读数如表 2 所示。由表 2 数据绘制的反映风积土孔隙比与时间关系的固结试验曲线如图 3 所示。

从图中可以看出，固结初始阶段过后，固结速率增大，曲线变陡，固结速率降低，这表明主固结已完成，进入次固结压缩阶段。图 3 也表明，不同压力下的 $e-\lg t$ 曲线的线型有较大区别：随着压力的增大，主、次固结的划分由不明显变为明显，之后又变为不明显，这与饱和软黏土明显不同^[4]。这主要是由于饱和软黏土含水率和孔隙比均比较大，而风积土含水率和孔隙比较小，并且其结构性比较

强的缘故。所以, 风积土的主、次固结的划分及次固结变形在从变形中所占的比例与固结压力有关, 在沉降计算中不容忽视。

表2 百分表在不同压力下数值表
Table 2 The numerical tabular of dial indicator under different pressures

经过时间 / min	压力/ kPa					
/ min	50	100	200	300	400	800
0	7.639	7.518	7.274	6.709	6.367	6.149
0.1	7.629	7.470	7.150	6.670	6.350	6.650
0.25	7.615	7.455	7.090	6.663	6.349	6.600
1	7.612	7.450	7.030	6.641	6.345	5.525
4	7.610	7.430	6.945	6.608	6.338	5.441
6.25	7.609	7.428	6.915	6.582	6.329	5.418
9	7.605	7.420	6.898	6.559	6.319	5.395
12.25	7.603	7.418	6.878	6.541	6.309	5.382
16	7.601	7.410	6.860	6.529	6.301	5.372
20.25	7.600	7.403	6.850	6.508	6.291	5.362
25	7.599	7.399	6.841	6.495	6.298	5.359
30.25	7.598	7.391	6.830	6.483	6.279	5.351
36	7.597	7.390	6.825	6.473	6.272	5.346
42.25	7.596	7.388	6.815	6.469	6.268	5.342
49	7.594	7.385	6.809	6.461	6.261	5.338
64	7.592	7.381	6.800	6.451	6.250	5.330
100	7.590	7.372	6.782	6.449	6.234	5.324
200	7.578	7.360	6.768	6.422	6.216	5.311
1 380	7.52	7.280	6.712	6.373	6.153	5.285
1 440	7.518	7.274	6.709	6.367	6.149	5.282

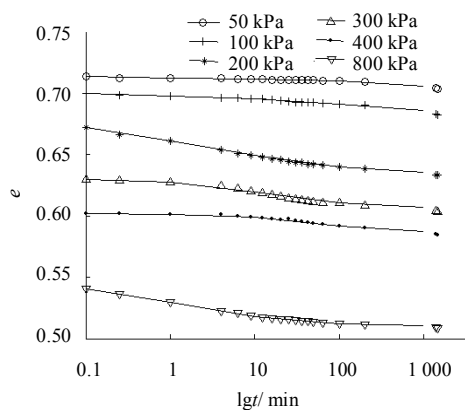


图3 风积土的 $e-lgt$ 曲线图
Fig. 3 The $e-lgt$ curves of aeolian soil

4.3 固结系数变化规律

关于固结系数 C_v 的推求方法, 目前主要有: 时间对数法、时间平方根法、试算法、三点计算法、反弯点法和 Scott 法等, 而国内最常用的方法为时间平方根法和时间对数法。关于它们的原理与方法见有关标准与文献[3, 5, 6], 但它们都需要经过图解并结合计算进行推求, 往往存在人为因素。为避免这些因素的影响, 本文采用改进的三点法进行推求^[7]。

该方法由于不需要推求 d_0 (理论 0 点的量表读数) 与 d_{100} (固结度为 100 % 时对应的量表读数), 可直接利用试验曲线较可靠的中段, 避免了前部的误差与尾部次固结的影响, 因此值得推荐。此法原由日本西夫郎木 (B. Sivaram) 与寺完美一 (K. Samee) 提出^[5], 但原式出现不必要的 d_0 和 d_{100} , 本文中消除了 d_0 与 d_{100} , 直接用试验数据表示。原作者未得出如下近似分式:

$$T_v = \frac{\pi u^2 / 4}{(1 - u^{5.6})^{0.357}} \quad (1)$$

式中: u 为土层固结度; T_v 为时间因数, 当 $u < 0.53$ 时, 还可用下式:

$$T_v = \frac{\pi}{4} u^2 \quad (2)$$

取固结初期两点 (t_1, d_1) 与 (t_2, d_2) 代入上式,

并结合 $T_v = C_v t / H^2$ 和 $u = \left(\frac{d_i - d_0}{d_{100} - d_0} \right)^2$, 得

$$\frac{4 C_v}{\pi H^2} t_i = \left(\frac{d_i - d_0}{d_{100} - d_0} \right)^2 \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中: C_v 为土的固结系数; H 为土样试验前后平均厚度的 1/2。

固结后期取一点 (t_3, d_3) 代入式 (1) 得

$$\frac{4 C_v}{\pi H^2} t_3 = \frac{\left(\frac{d_3 - d_0}{d_{100} - d_0} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{d_3 - d_0}{d_{100} - d_0} \right)^{5.6} \right]^{0.357}} \quad (4)$$

上述式 (1)、式 (3) 和式 (4) 开根后, 相比与相减, 可解得 3 点法的直接表达式为

$$C_v = \frac{\pi}{4} \left\{ \frac{d_2 - d_1}{(d_3 - d_1)\sqrt{t_2} - (d_3 - d_2)\sqrt{t_1}} \cdot H \left[1 - \left(\frac{(d_3 - d_1)\sqrt{t_2} - (d_3 - d_2)\sqrt{t_1}}{d_2 - d_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_3}} \right)^{5.6} \right]^{0.179} \right\}^2 \quad (5)$$

$$\text{或令 } D_t = \frac{d_2 - d_1}{(d_3 - d_1)\sqrt{t_2} - (d_3 - d_2)\sqrt{t_1}} \quad (6)$$

$$\text{则 } C_v = \frac{\pi}{4} \left\{ D_t H \left[1 - \left(\frac{1}{D_t \sqrt{t_3}} \right)^{5.6} \right]^{0.179} \right\}^2 \quad (7)$$

本文 t_1 和 t_2 取 15 s 与 60 s 附近, t_3 取平均固结度为 80 % 左右的值。

研究表明^[8], 固结系数在压缩过程中并不是常数, 且与固结压力存在较好的相关性。在本试验中, 风积土的固结系数和固结压力对数之间的关系可以用 3 次多项式来拟合:

$$C_v = 0.0086(\lg p)^3 + 0.022(\lg p)^2 + 0.015\lg p + 0.0034 \quad (8)$$

拟合曲线如图 4 所示。由图可以看出, 在曲线开始阶段, 随着固结压力的增大, 固结系数 C_v 逐渐减小, 但当固结压力超过 400 kPa 以后, C_v 随 $\lg p$ 增大而增大。

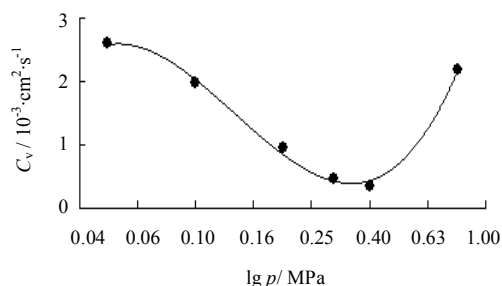


图 4 固结系数与固结压力关系图

Fig.4 Consolidation coefficient as a function of consolidation pressure

4.4 原状风积土结构性演化规律

谢定义等^[9]用释放结构势的方法寻求结构性的量化指标。综合利用扰动、加荷和浸水这 3 种因素与结构性之间的密切联系, 吸收土力学中在表征结构性方面的有效概念, 综合反映结构性在排列和联结两个方面的特征。本文以压缩试验为基础, 对原状土试样 (欲研究其结构性的土)、饱和土试样以及重塑土试样 (湿密状态不变) 分别进行压缩试验, 得到 3 条压缩变形曲线, 如图 5 所示, 作为研究结构性的基本依据 (称 3 线法)。以综合结构势为土结构性参数, 用下述方法表示^[9]:

$$m_p = \frac{m_1}{m_2} = \frac{S_s/S_o}{S_o/S_r} = \frac{S_r S_s}{S_o^2} \quad (9)$$

式中: m_p 为综合结构势; S_o , S_s , S_r 分别为原状样、饱和样和重塑样在某一压力 P 下的变形量 (或应变量)。

从式 (9) 的定义可以看出来, 土的联结越强, 扰动重塑引起强度的损失越大, 在力作用下发生的变形也越大, 即 m_2 越小; 土的排列越不稳定, 浸水

后在力的作用下结构破坏越大, 发生的变形也越大, 即 m_1 越大。用一个越小的值 m_2 去除一个越大的值 m_1 来表示土的结构性参数 m_p 这将具有更大的敏感性。因此, 结构性的强弱与 m_p 的大小具有直接的联系。综合结构势能够与荷载作用相联系, 反映土在受荷过程中原始结构的逐渐破坏, 次生结构逐渐形成的耦合和动态变化规律, 而且这种方法适用于大多数结构性土, 是目前在结构性研究上较为成熟的一种方法。本文即是采用上述方法研究土的原始结构性。

风积土的变形曲线如图 5 所示。从图亦可以看出, 在相同压力作用下饱和土样的压缩量最大, 重塑土样次之, 原状土样的压缩量最小。

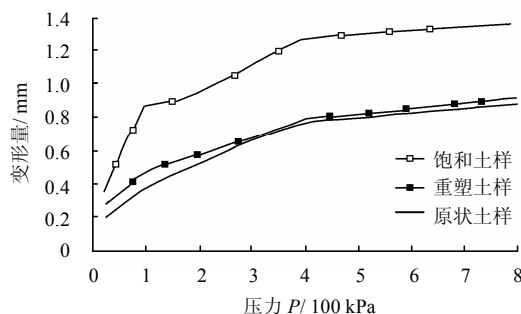


图 5 不同压力下风积土的变形曲线图

Fig.5 The deformation curves of aeolian soil under different pressures

由上述变形曲线可得风积土的结构性参数变化规律, 并与谢定义对兰州、潍坊原状土进行了比较^[10], 如图 6 所示。

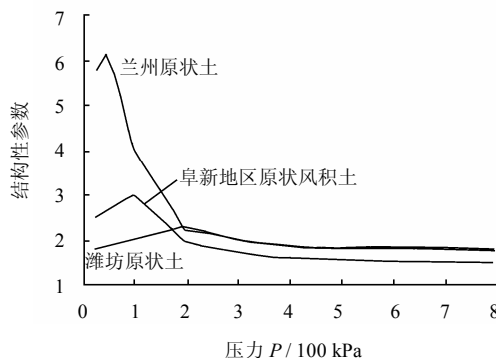


图 6 阜新及其他地区土的结构性参数曲线图

Fig.6 The structural character parameter curves of clays in Fuxin and other areas

从图中可以看出, 不同地区土的结构性明显不同, 因此, 研究不同地区土的结构性是有实际意义的。土的结构性参数在压力未达到结构强度以前较

高,而且随压力的增大略有提高,反映了一定的结构调整与压密效果;接着,结构联结遇到破坏,结构性系数明显降低,降低的速率随压力的增大而逐渐减小;最后,它基本稳定在一个水平上。这表明压力超过结构强度较小时,土颗粒的排列的不稳定势较大,在较小的应力增量下,可以引起较大的突变,这时土的结构性较大;反之,在压力较大时,土颗粒原有的不稳定势被大大削减,在相同的应力增量下,不会引起较大的突变,这时土的结构性较小,之后压力的增大已经不能使土的密度进一步增大,而稳定在一个水平上。

5 结 论

(1) 通过室内一维固结试验,绘制了 $e-p$ 曲线图,通过计算不同状态下 a_{1-2} 的值,说明原状土的压缩性最小,重塑土次之,饱和土压缩性最大,这是风积土结构性比较明显的外在表现。

(2) 不同压力下的 $e-lgt$ 曲线的线型有较大区别:随着压力的增大,主、次固结的划分由不明显变为明显,之后又变为不明显,这与饱和软黏土明显不同。因为次固结变形在总变形中占有一定的比例,所以在沉降计算中不容忽略。

(3) 固结系数在压缩过程中并不是常数,且与固结压力存在较好的相关性,固结系数与固结压力的对数之间可以用3次多项式来拟合。但是,该结论只是基于有限土样的试验结果,有待于进一步的研究与验证。

(4) 以综合结构势为土结构性参数,研究了阜新地区风积土的结构性演化规律,并与其他地区的土壤进行了对比分析,表明结构性有所不同。

参 考 文 献

- [1] MESRI G. Discussion[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1975, 101(GT4): 409—412.
- [2] LEROUÉIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soil and weak rock[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 467—488.
- [3] 袁聚云. 土工试验与原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [4] 张芳枝, 陈晓平, 黄国怡. 珠江三角洲饱和软黏土的固结特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2003, 24(增 2): 192—194.
ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping, HUANG Guo-yi. Experimental investigation of consolidation behavior of the Pearl Delta saturated soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.2): 192—194.
- [5] SIVARAM B, et al. A computational method for consolidation coefficient[J]. **Soils and Foundations**, 1997, 17(2): 48—52.
- [6] SCOTT R E. New method of consolidation coefficient evaluation[J]. **Proc. The American Society of Civil Engineers**, 1976, (1): 29—39.
- [7] 熊兴邦, 陈钟. 固结系数的算法[J]. **工程勘察**, 1994, (6): 17—20.
- [8] 马驯. 固结系数与固结压力关系的统计分析及研究[J]. **港口工程**, 1993, (1): 46—53.
- [9] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量参数研究的新途径[J]. **岩土工程学报**, 1999, 21(6): 651—656.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [10] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形-强度的关系[J]. **水利学报**, 1999, (10): 1—6.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHU Yuan-lin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1999, (10): 1—6.