

相对厚度变化下双层软黏土地基固结特性研究\*

雷华阳<sup>1,2</sup>,任倩<sup>1</sup>,卢海滨<sup>1</sup>,李宾<sup>1</sup>

(1.天津大学 建筑工程学院,天津 300072;2.天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室,天津 300072)

**摘 要:**采用改装的固结仪,针对吹填场区特有的双层软黏土地基,开展了固结特性试验研究,探讨了土层相对厚度变化对地基变形特性的影响规律。试验结果表明:单层软黏土的变形随试样厚度的增加而增大,双层软黏土的变形与试样厚度比呈明显的正相关关系;上层土厚度为2 cm的双层试样与高度为2 cm的单层试样,前者的稳定沉降大于后者,荷载等级较大时,双层试样的沉降曲线分离程度明显大于单层试样;随着厚度比的增大,厚度比变化对双层地基土体变形的影响逐渐减小;压缩指数随单层软黏土厚度的增大而增大,增大幅度不明显;相对于下层试样,上层试样对双层试样的沉降变形影响更大;随着上层压缩性大的土层厚度的增加,双层地基变形增大、固结速率减小。受土体结构性随固结应力变化的影响,不同厚度及厚度比试样,其沉降曲线随固结压力的增大呈“S”型变化。

**关键词:**双层地基;厚度比;吹填场区;单层地基;压缩指数

中图分类号:TU443      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0705-07

Research on Consolidation Property of Double Layer Soft Clay Foundation under Different Relative Thickness Conditions

Lei Huayang<sup>1,2</sup>, Ren Qian<sup>1</sup>, Lu Haibin<sup>1</sup>, Li Bin<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P.R.China; 2.Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, P.R. China)

**Abstract:** Using the modified oedometer, a series of consolidation tests on samples of different size are performed on unique double layer soft clay foundation of reclamation land, which is proposed to study the influence of changes in the relative thickness of soil on the consolidation property. The results show that the final stable deformation increases along with the increasing of thickness of the homogeneous sample and thickness ratio of bilayer specimen. The final stable deformation of bilayer specimen with 2 cm thick upper soil is bigger than that of single sample with 2 cm height, and the strain-time curve degree of separation of bilayer sample significantly is greater than monolayer sample with larger load. Double foundation thickness ratio increasing to a certain extent, the impact on soil deformation will gradually decrease. Compression index decreases slightly along with increasing thickness of soft clay. Compared with the lower sample, the upper sample has a greater impact on settlement deformation. With the increasing thickness of upper compression soil, the deformation increases and consolidation rate decreases. Because of soil structure changing with consolidation stress, the strain curve of sample with different thickness and thickness ratio is "S" type with the increasing consolidation pressure.

**Keywords:** double layer foundation; thickness ratio; reclamation land; single layer foundation; compression index

\* 收稿日期:2017-10-16(修改稿)  
作者简介:雷华阳(1974-),女,河北冀州人,博士后,教授,主要从事岩土工程的教学与科研工作。  
E-mail:Leihuayang74@yahoo.com.cn  
基金项目:国家自然科学基金(51378344);天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(14JCYBJC21700)

0 引言

近年来,围海造陆工程总体发展趋势表现为吹填土质由早期的无黏性粉砂粒料,逐渐转为以黏粒含量占主要成分的软黏土。大量工程实践发现,吹填场地地基土在工程特性上与历经数百万年形成的天然地基存在较大差异<sup>[1-2]</sup>,既不同于天然地基,又有别于人工换填的地基,而是与下卧正常沉积软土形成典型的“上生下熟”的欠固结双层软黏土地基。随着时间的推移,此类地基经常出现各种各样的工程问题,甚至导致建(构)筑物出现不同程度的破坏。如长江口软土地基上建造的导堤和天津滨海新区围海造陆的外围堤,在波浪往返荷载作用下都产生了较大的沉降和位移,甚至发生了整体失稳;天津市经济技术开发区在大面积新填土堆载作用下,13 年沉降量高达 505 mm,且目前每年仍有 10 mm 左右沉降,给新区建设带来较大的困扰。由此可见,加强吹填场区双层软黏土地基的变形特性研究,对工程安全运营和工后不良工程影响控制有十分重要的意义。

双层地基的固结理论历来为国内外岩土工程界所关注<sup>[3-5]</sup>,Davis 等<sup>[3]</sup>最先对瞬时荷载作用下双层地基固结问题进行了研究。栾茂田等<sup>[6]</sup>建立了不同时刻各深度处孔隙水压力及总体固结度的解析计算公式,获得了双层地基饱和土体孔隙水压力扩散与消散的理论解答。谢康和等<sup>[7-8]</sup>给出了荷载随时间任意变化及起始孔压沿深度任意分布情况下双层地基一维固结的解析解。此外,大量研究表明,土层相对厚度变化对双层地基的影响不可忽略,费涵昌等<sup>[9]</sup>通过离心模拟试验研究表明,双层地基持力层越厚,软弱下卧层对减小沉降越有利,变形主要发生在基础宽度 1.6 倍深度之内。

目前,已有研究多集中于超固结双层地基<sup>[10-16]</sup>, (如徐长节等<sup>[17]</sup>研究了欠固结饱和软黏土地基在任意荷载作用下的单层地基非线性一维固结问题),很少把吹填场区双层黏土地基作为一个完整体系进行研究,导致了对其工程特性的理论研究远远落后于工程实践。

为此,针对天津滨海新区吹填场地双层软黏土地基,开展了一系列的室内固结试验,探讨了双层软黏土地基的变形特性,分析其不同于均质单层地基的固结沉降规律,为进一步研究欠固结双层地基一维固结问题提供理论参考。

1 试验简介

土样取自天津滨海新区围海造陆工程场区地基土,上层土性为黏土,可塑状态,土质较均匀;下层土性为粉质黏土,灰色,硬塑。具体的物理性质指标见表 1。

表 1 土样物性指标

Table 1 Physical properties of soil

土性	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $w/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_l/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	初始孔隙比 $e_0$
黏土	1.757	50.3	30.1	58.5	33.8	1.340
粉质黏土	2.04	23.6	19.0	32.8	13.81	0.647

为探究双层软黏土地基上、下土层厚度变化时的固结特性,上、下单层土分别设置了 2 cm、4 cm、6 cm 3 个不同厚度的试样(以下依次简称  $S_u$ 、 $M_u$ 、 $L_u$ 、 $S_d$ 、 $M_d$ 、 $L_d$ ),双层土设置了上下层厚度比为 0.33 (2 : 6)、1 (4 : 4)、3 (6 : 2) 的 3 组高度均为 8 cm 的双层试样(以下分别简称  $D_{2+6}$ 、 $D_{4+4}$ 、 $D_{6+2}$ )。由于现有的单向固结仪只能做常规的试样高度 2 cm 的固结试验,通过定制不同高度的环刀(4 cm、6 cm、8 cm)及相应高度的支撑杆,对实验仪器进行改装。定制的环刀以及改装后的仪器如图 1 和图 2。



图 1 不同高度的环刀

Fig. 1 Circular knives of different heights



图 2 改装后的单向固结仪

Fig. 2 The modified oedometer

为减小土样的扰动,取土时采用薄壁取土器,且在制样的过程中,为避免环刀与土样的侧壁摩擦力影响试验结果,在装样前均匀涂抹凡士林。严格按照土工试验规程 SL237—1999 依次制备 3 种不同厚度的试样。制备双层土样时,利用压样器将预先备好的上下层土样,按照设定的厚度比依次压进 8 cm 高环刀中,且试验时为使上下层充分接触,首先施加 2 kPa 的预压荷载,然后再正常加载。

试验在常温双面排水的条件下进行,具体的试验方案如表 2 所示。所有试验统一按如下方案加载:12.5、25、50、100、200、400、800、1 200 kPa。每组试样面积均为 30 cm<sup>2</sup>,以定时观测变形小于 0.005 mm/d 为稳定标准,待一级荷载下变形稳定后加下一级荷载,数据采集记录采用 TWJ 微机数据采集处理系统。

表 2 试验加载方案  
Table 2 Test loading plan

试验类型	土样类型	试验编号	试样厚度或厚度比
单层试验	黏土	S <sub>u</sub>	2 cm
		M <sub>u</sub>	4 cm
		L <sub>u</sub>	6 cm
	粉质黏土	S <sub>d</sub>	2 cm
		M <sub>d</sub>	4 cm
		L <sub>d</sub>	6 cm
双层试验	上层黏土+ 下层粉质黏土	D <sub>2+6</sub>	0.33(2:6)
		D <sub>4+4</sub>	1(4:4)
		D <sub>6+2</sub>	3(6:2)

2 试验结果与分析

2.1 沉降-时间曲线的变化特点

图 3(a)~(c) 给出了分级加载条件下双层试样不同厚度比下的沉降曲线。由图可知,随着荷载的增加,试样的沉降逐渐增大,相对于较低荷载,在荷载等级较大时,沉降的增加更为明显。如图 3(a) 所示,轴向荷载为 12.5 kPa 和 25 kPa 时,两者的沉降曲线很接近,且沉降量相对较小,而当荷载等级大于 50 kPa 以后,各级荷载的沉降曲线逐渐分离,如荷载为 12.5 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa 时,两两间的沉降增量依次为: 0.428 mm、0.817 mm、1.233 mm。由此可看出,随荷载的增大,沉降明显增加,沉降曲线的分离程度逐渐增大。分析其原因,主要有两个方面:一方面,较低荷载作

用下,土样的变形受到土体结构性的约束,变形较小;随着荷载的增大,土体的结构性受到破坏,土体趋于重塑土,变形较大。另一方面,随着荷载的增大,各级荷载间的增量增大,也加大了各级荷载间的沉降差值,导致随荷载的增大沉降曲线分离程度逐渐明显。

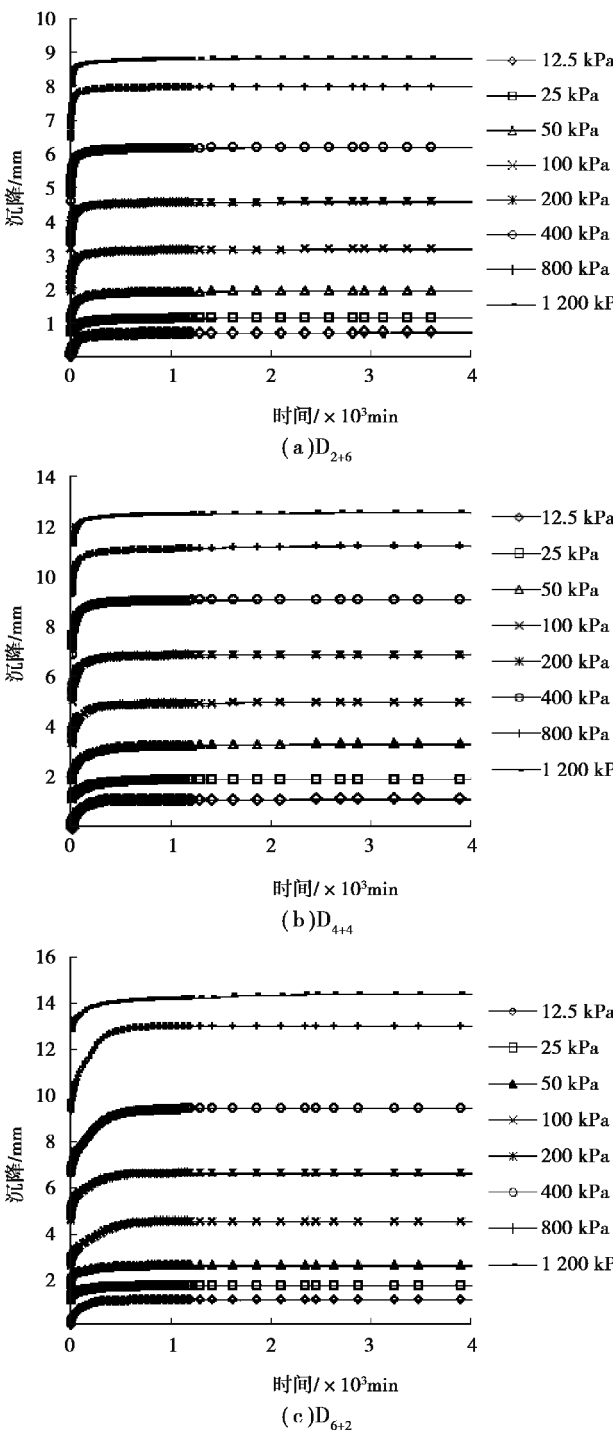


图 3 双层试样不同厚度比下的沉降曲线

Fig. 3 Settlement vs. time curves of double layer samples with different thickness ratios

压缩指数  $c_c$  是压缩曲线  $e-\lg p$  的斜率,工程中

采用的是结构破损阶段近似直线段的斜率。不同厚度土样的压缩指数拟合结果见表 3。

表 3 不同厚度土样的压缩指数

Table 3    Compression index of samples with different thicknesses			
试样厚度/cm	2	4	6
上层压缩指数	0.065	0.071	0.075
下层压缩指数	0.016	0.018	0.023

由表 3 中不同厚度土样的压缩指数可知,同一土层随厚度的增加,压缩指数增大幅度不明显。分析其原因,主要是由于土体的压缩性取决于土体的土颗粒的性质、连接、排列,与土体的厚度没有太大的关系。由此可知,随着土体厚度的增大,厚度变化对土体的变形影响将会减弱。如表 4 和图 4 所示, $S_u$ 、 $M_u$ 、 $L_u$  试样在 400 kPa 荷载下的稳定沉降分别是 3.842 mm、6.924 mm、8.453 mm,两两间的差值依次减小(3.082 mm、1.529 mm),曲线随厚度的增大越来越接近,即厚度变化对土体的影响逐渐减小。

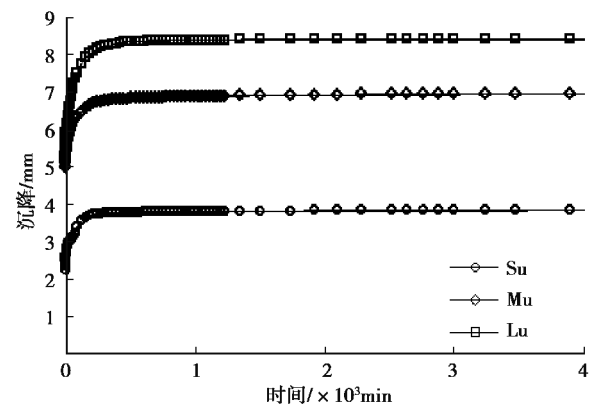


图 4 400 kPa 时上层试样沉降曲线

Fig. 4    Curves of settlement vs. time of the upper samples under 400 kPa

此外,双层试样的变形量随上层土样厚度的增大而增大。如表 4 和图 5 所示, $D_{2+6}$ 、 $D_{4+4}$ 、 $D_{6+2}$  试样在 400 kPa 荷载下的稳定沉降依次递增(6.192 mm、9.090 mm、9.542 mm),另外,两两之间的变化量分别为 3.729 mm、1.851 mm,曲线随厚度比的增大越来越接近。由此可知,随着厚度比的增大,厚度比变化对双层试样变形的影响逐渐减弱。

对比上层土厚度为 2 cm 的双层  $D_{2+6}$ (厚度比为 2 : 6)与高度均为 2 cm 的单层  $S_u$ 、 $S_d$  试样,三者最终稳定变形量依次减小(11.664 mm、5.352 mm、2.124 mm),同时,荷载等级较大时,双层试样的沉降曲线分离程度明显大于两单层试样。如相邻荷

载 800 kPa 和 1 200 kPa 下, $D_{2+6}$  试样的沉降差值是  $S_u$  试样的 6.35 倍。究其原因,是下层土的压缩性低于上层土。根据侧限压缩模量  $E_s$  和压缩系数  $a$  的定义可得出公式(1),结合图 6 的  $e$ -lg  $p$  关系曲线可求得上、下土层的压缩系数和压缩模量(见表 5),由此可知上层土的压缩性较大,使得同等级荷载下  $S_d$  的变形小于  $S_u$ ,又  $D_{2+6}$  试样受下层 6 cm 厚软土变形的影响,使得  $D_{2+6}$  试样的最终沉降大于  $S_u$  试样,且荷载等级越大,单双层试样之间沉降的变化差距越明显。

表 4 不同厚度及厚度比下的稳定沉降

Table 4    Stable settlement under different thicknesses or thickness ratios									
荷载 /kPa	稳定沉降/mm								
	上层试样 沉降/mm			下层试样 沉降/mm			双层试样 沉降/mm		
	$S_u$	$M_u$	$L_u$	$S_d$	$M_d$	$L_d$	$D_{2+6}$	$D_{4+4}$	$D_{6+2}$
12.5	0.543	1.095	1.449	0.229	0.245	1.270	0.688	1.135	1.155
25	0.618	1.316	1.984	0.325	0.446	1.389	1.116	1.936	2.063
50	0.959	1.713	1.799	0.494	0.578	1.83	1.933	3.339	3.618
100	1.547	4.29	4.312	0.716	0.959	2.68	3.166	4.988	5.077
200	2.240	5.015	5.586	1.027	1.418	3.693	4.578	6.911	7.234
400	3.842	6.924	8.453	1.405	1.988	5.187	6.192	9.09	9.542
800	4.950	9.460	10.65	1.848	2.850	7.006	8.994	11.224	12.689
1 200	5.352	10.374	10.86	2.124	3.463	8.137	11.664	12.558	14.409

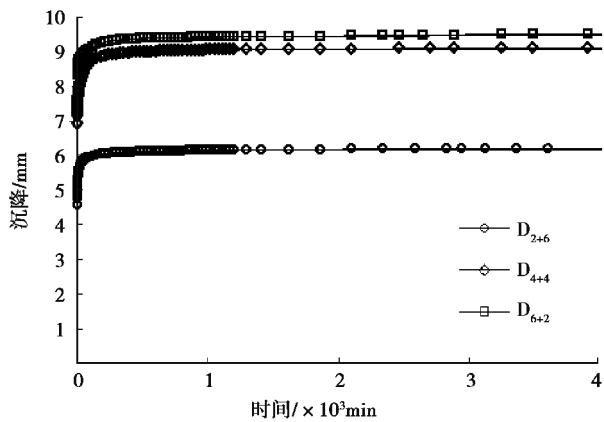


图 5 400 kPa 时双层试样沉降曲线

Fig. 5    Curves of settlement vs. time of the double  
layer samples under 400 kPa



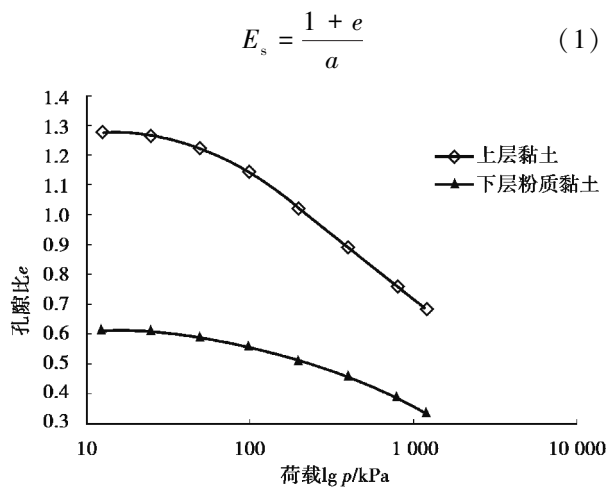


图 6 2 cm 上、下层土的  $e$ - $\lg p$  曲线

Fig. 6 Curves of  $e$ - $\lg p$  of the upper and lower soil with 2 cm

表 5 上、下层 2 cm 土样压缩模量

Table 5 Compressive modulus of the upper and lower soil with 2 cm		
2 cm 土样	上层黏土	下层粉质黏土
压缩系数 $a_{0.1-0.2}/(\text{MPa}^{-1})$	0.81	0.25
压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/(\text{MPa})$	2.01	6.21

2.2 沉降-荷载的变化特点

在一定厚度范围内,土层变形随土层厚度的增大而增加,但当土层厚度增大到一定程度时,相同荷载增量下,随着土样高度的增加,土样排水路径加长,排水固结速度随土样高度的增大而减小,导致土体的压缩变形随土样高度的增大变化不明显。与此同时,荷载较小时,试样的变形受到土体结构性的约束,变形较小,当荷载较大时,土体的结构性受到破坏,土体趋于重塑土,变形较大,随着加载过程的继续,后期阶段土体逐渐被压密,孔隙体积减小幅度较低,土体变形较小。

图 7 给出了不同荷重下试样的最终稳定沉降与荷载的对数关系曲线,说明了土层厚度变化对固结特性的影响。从图中可以看出,单层土样随试样厚度的增加,土样的稳定沉降逐渐增大,且双层试样随上层土样厚度的增加,稳定沉降也逐渐增大。如 1 200 kPa 时,双层试样  $D_{2+6}$ 、 $D_{4+4}$ 、 $D_{6+2}$  相应的稳定沉降分别为 8.829 mm、12.558 mm、14.409 mm。据此可知,双层地基的沉降变形随上层渗透性差、压缩性高的土层厚度增加而增大,随下层渗透性好、压缩性低的土层厚度增加而减少,并且下层正常沉积土越厚,对减小变形越有利。

此时,也可以发现,随着厚度比的增大,双层试

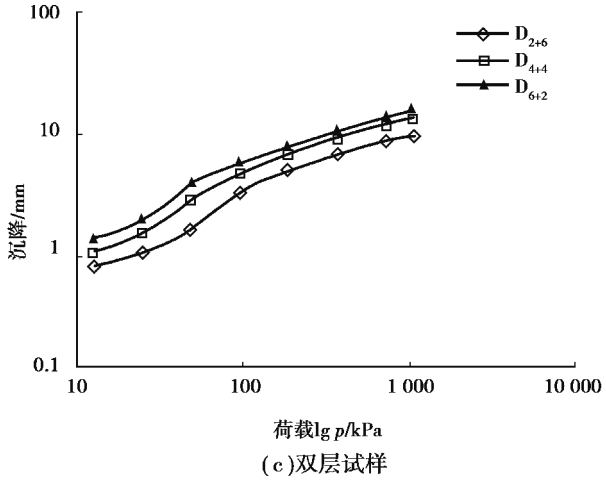
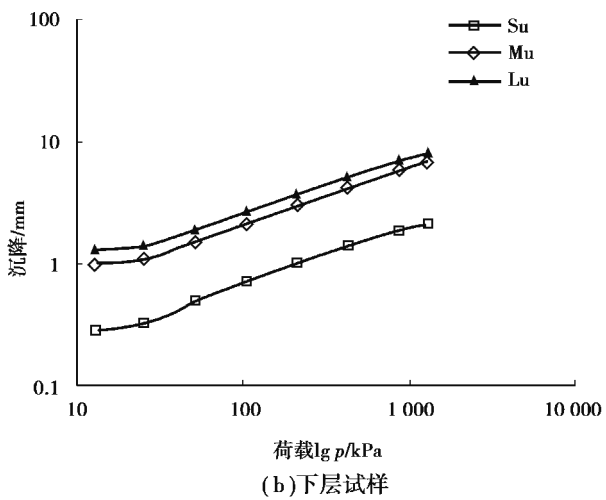
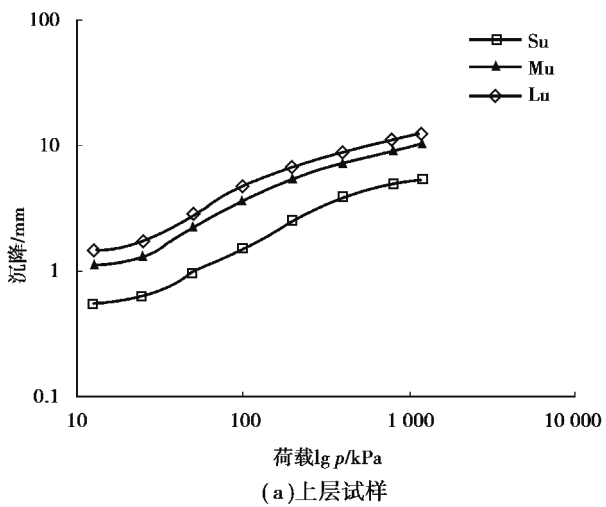


图 7 沉降-荷载双对数关系曲线

Fig. 7 Logarithmic curves of loading stress vs. thicknesses or thickness ratios

样中下层土的沉降量逐渐减小,除厚度影响外,下层土表面总应力随厚度比的增大逐渐减小也是导致下层沉降量减小的原因。如 400 kPa 时,上下土层交界面处的总应力随厚度比 2 : 6、4 : 4、6 : 2 的变化依次为 366.571 kPa、270.591 kPa、222.303

kPa。此外,由图 7 可以发现,上层试样  $M_u$  和  $L_u$  及双层试样  $D_{4+4}$  和  $D_{6+2}$ ,各级荷载下的稳定沉降差别不大,而下层试样  $M_d$ 、 $L_d$  较接近。由此可知,相对于下层土样,上层土样的沉降特性对双层土样的变形有较大影响。

由图 7 可以发现,试样的最终稳定沉降随着荷重的变化整体呈现逐渐增加的“S”形曲线,如图 7 (a) 所示。在低应力水平下(小于 25 kPa)沉降曲线呈下凹型增长,之后随着固结压力的增加,稳定沉降近似线性增长趋势。试样  $D_{4+4}$  在 25 kPa 时,变形量占总变形量的 11.5%,当固结压力增加到 800 kPa 时,试样变形量达到了总变形量的 90.6%,即荷重介于 25~800 kPa 时,变形改变量很大,后期高应力水平下,变形量变化趋于平缓。究其原因,可认为是上述土的结构性随加载过程而变化造成的。

另外,试样  $D_{2+6}$ 、 $D_{4+4}$ 、 $D_{6+2}$ ,400 kPa 下的稳定沉降占总沉降量比例分别为 78%、70%、66%。由此可知,随着上层压缩性大的土体厚度的增加(厚度比逐渐增大),双层试样的固结速率随之减小。据此说明了,减小双层地基中压缩性大的土层厚度,不仅能减小地基变形量,同时也能加快地基的固结速率。

图 8 为双层试样不同厚度比下总沉降量比较图。双层软黏土地基的沉降变形并非对应的上下单层地基变形的叠加,除厚度影响外,上下土层压缩模量和渗透性的差异也是导致相同厚度单层土变形量的叠加大于相应厚度比的双层地基的变形量。如 400 kPa 时,上层 2 cm 试样与下层 6 cm 试样变形量的叠加值与双层试样 2:6 的变形量相差 2.873 mm,其他两组对应差值依次为 1.080 mm、0.672 mm。同时,随着双层地基厚度比的增加,上、下层变形的叠加值曲线与对应双层地基变形曲

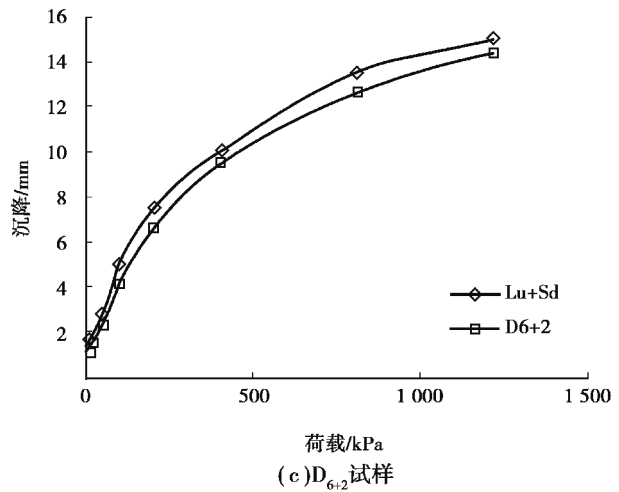
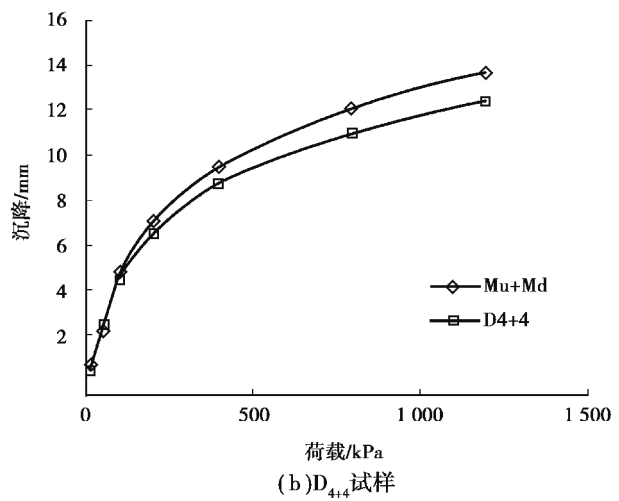
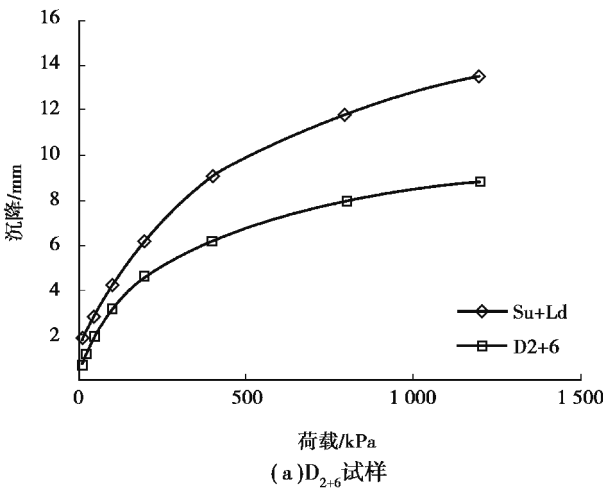


图 8 各级荷载下稳定沉降与固结压力关系曲线  
Fig. 8 Curves of stable settlement under different loading stresses  
线逐渐接近,再次佐证了,相对与下层土样,上层土样对双层地基的沉降变形影响更大。

### 3 结论

针对天津吹填场区地基土,对不同厚度的单层试样及不同厚度比的双层试样进行了一系列固结试验及分析,得到如下结论:

(1)不同厚度及厚度比的试样,各级荷载下沉降曲线大致呈如下规律:较低荷载下,土的变形主要为弹性变形,结构性比较完整,变形小;随着荷载的增大,颗粒间的结构塌陷,土体结构性遭到破坏,土体变形显著增大。

(2)单层软黏土的变形随土样厚度的增大而增加,且随着厚度的增大,厚度变化对土体变形的影响逐渐减弱;双层软黏土的变形与试样厚度比呈明显的正相关关系,且随着厚度比的增大,厚度比变化对土体变形的影响逐渐减弱。

(3)双层试样的变形小于上下单层试样变形

的叠加,随厚度比的增加两者的差距越来越小;上层土厚度为2 cm的双层试样与高度均为2 cm的单层试样,三者最终稳定变形量依次减小,荷载等级较大时,双层试样的沉降曲线分离程度明显大于两单层试样;上层土样对双层试样的影响比下层土样更显著;受土体结构性随固结应力变化的影响,沉降随固结压力的增大呈“S”形变化。

(4)减小双层地基中压缩性大的土层厚度,不仅能减小地基变形量,同时也能加快地基的固结速率。

# 参考文献(References)

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:水利电力出版社, 1983. (Huang Wenxi. The engineering properties of soil [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983. (in Chinese))
- [2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (Li Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [3] Davis E H, Raymond G P. A non-linear theory of consolidation [J]. Geotechnique, 1965, 15 (2): 161-173.
- [4] Mesri G, Rokhsar A. Consolidation of normally consolidated clay [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, 1974, 100 (GT8): 889-903.
- [5] Mesri G, Choi Y K. Settlement analysis of embankments on soft clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1985, 111(4): 441-464.
- [6] 栾茂田, 钱令希. 层状饱和土体一维固结分析[J]. 岩土力学, 1992, 13(4): 45-56. (Luan Maotian, Qian Lingxi. One-dimensional consolidations analysis of layered saturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13(4): 15-56. (in Chinese))
- [7] 谢康和. 双层地基一维固结理论与应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 24-35. (Xie Kanghe. Double-layered ground and its applications [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(5): 24-35. (in Chinese))
- [8] 谢康和, 潘秋元. 变荷载下任意层地基一维固结理论[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 80-85. (Xie Kanghe, Pan Qiuyuan. A one-dimensional consolidation theory of layered foundation under time dependent loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 80-85. (in Chinese))

- [9] 费涵昌, 王广欣, 曹来发. 双层地基的变形与沉降[J]. 同济大学学报, 1995, 23(3): 288-293. (Fei Haichang, Wang Guangxin, Cao Laifa. Deformation and settlement of double-layer subgrade [J]. Journal of Tongji University, 1995, 23(3): 288-293. (in Chinese))
- [10] Garlanger J E. The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress [J]. Geotechnique, 2007, 28(4): 743-746.
- [11] Mesri G, Rokhsar A. Theory of consolidation for clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1974, 100 (GT8): 889-904.
- [12] Gobara W. Uma teoria do adensamento para argilas pelo efeito do adensamento [R]. Tese do doutorado, EPUSP S Paulo (in Portuguese), 1997.
- [13] 周瑾. 考虑应力历史影响的双层地基一维固结理论[D]. 杭州:浙江大学, 2005. (Zhou Jin. Study on one-dimensional consolidation theory of double-layered soil considering the effect of stress history [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [14] 温介邦, 谢康和, 胡安峰. 双层超固结软土地基一维非线性固结分析[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 226-232. (Wen Jiebang, Xie Kanghe, Hu Anfeng. Analysis on one-dimensional nonlinear double-layered over-consolidation soil foundation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 226-232. (in Chinese))
- [15] 谢康和, 温介邦, 应宏伟, 等. 考虑应力历史的双层地基一维固结问题[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(7): 1126-1131. (Xie Kanghe, Wen Jiebang, Ying Hongwei, et al. One-dimensional consolidation theory of double-layered soil considering effects of stress history [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2007, 41(7): 1126-1131. (in Chinese))
- [16] 温介邦. 考虑应力历史影响的成层地基一维固结理论研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007. (Wen Jiebang. Studies on one-dimensional consolidation theory of layered soils considering the effect of stress history [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [17] 徐长节, 耿雪玉, 蔡袁强. 任意荷载下欠固结地基的非线性一维固结[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 389-394. (Xu Changjie, Geng Xueyu, Cai Yuanqiang. One-dimensional nonlinear consolidation of under consolidation clay under arbitrary loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 389-394. (in Chinese))