

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.005

吹填场区双层软黏土地基超载比 与卸载控制试验研究

雷华阳^{1,2}, 任 倩¹, 卢海滨¹, 李 宾¹

(1. 天津大学 土木工程系, 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: 对于围海造陆工程所开展的超载预压处理方法, 地基处理效果通常采用后续变形大小来评价, 其大小与超载比和卸载控制时间密切相关。针对天津滨海地区围海造陆工程所形成的典型的上软、下硬的双层软黏土地基, 采用改装的固结仪进行了多种超载比和卸载控制时间的试验研究, 提出了适宜的超载比和最佳超载作用时间。试验表明: 双层软黏土地基超载比大于 0.375, 超载作用时间超过主固结时间时, 超载卸除后地基变形以回弹变形为主, 后续的工后沉降将明显减小, 减小幅度可高达 70% 以上; 超载卸除后的土体次固结系数明显减小, 减小的幅度随超载比的增大、超载作用时间的增加而减小; 不同于均质地基和上硬下软的双层地基, 上软、下硬双层地基的工后沉降以上部软土层沉降为主, 约占总沉降量的 73% 以上。根据不同超载比和超载作用时间下土体的变形时程曲线, 建议适宜天津滨海地区围海造陆工程软黏土地基的超载比控制在 0.5 以下, 超载作用时间控制在 1~3 倍的主固结时间内。

关 键 词: 双层软黏土地基; 超载预压; 超载比; 超载作用时间; 主固结时间

中图分类号: TU 471.8

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2016) 11—3072—08

Experimental study of overload ratio and unloading control of double-layer soft clay foundation in a dredger fill site

LEI Hua-yang^{1,2}, REN Qian¹, LU Hai-bin¹, LI Bin¹

(1. Department of Architectural Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For surcharge preloading method used in land reclamation, the effect of ground treatment is usually evaluated by subsequent deformation, which depends largely upon the overload ratio and unload controlling time. This research focuses on the double-layer soft clay foundation with the upper soft layer and lower hard layer in coastal area in Tianjin. The appropriate overload ratio and the best time of overload are determined by consolidation experiment used a modified oedometer under various overload ratios and unload controlling times. The results show that when overload ratio is larger than 0.375 and overload time is longer than the primary consolidation time, the foundation deformation is mainly resilient deformation after overload removed. At the same time, the post-construction settlement decreases significantly by up to 70 percent. Secondary consolidation coefficient significantly reduces after removing the overload, and the longer the overload time and the overload ratio are, the smaller secondary consolidation coefficient is. Unlike the homogeneous foundation and the upper hard and lower soft double-layer foundation, the post-construction settlement of upper soft and lower hard double-layer foundation mainly comes from the upper soft soil layer, accounting for more than 73% of the total settlement. According to deformation curves under different overload ratios and overload times, it is suggested that the suitable surcharge ratio is 0.5 or less and the best overload time is controlled within 1 to 3 times the primary consolidation time for the layer soft clay foundation by land reclamation in coastal area in Tianjin.

Keywords: double layer soft clay foundation; surcharge preloading; overload ratio; overload time; primary consolidation time

收稿日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51378344); 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目 (No. 14JCYBJC21700); 天津市科技兴海项目 (No. KJXH2013-15)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51378344), Tianjin Application Basic and Frontier Technology Research Plan Project (14JCYBJC21700) and the Program of Strengthening the Ocean by Science and Technology of Tianjin City Government (KJXH2013-15).

第一作者简介: 雷华阳, 女, 1974, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土工程的教学与科研工作。Email: leihuyang74@163.com

1 引言

为解决人多地少，土地资源紧缺的问题，我国沿海城市开展了围海造陆工程以实现陆域大面积增加。近年来，围海造陆工程中吹填土总体发展趋势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^[1-2]。由新近吹填土经真空预压排水处理而成的软黏土，其含水率、压缩性均高于下层正常沉积软土，两者形成了典型的上软、下硬的双层软黏土地基。此类地基的承载力和稳定性往往不满足工程要求，因此，需要进行加固处理。目前，常采用超载预压法、强夯法、喷射注浆、深层搅拌法等加固方法。其中超载预压加固方法具有提高地基土的抗剪强度、缩短工期、减小工后沉降、经济便捷等显著特点^[3-4]。

超载预压加固方法的效果评价可以从超载卸除后地基在建筑物荷载作用下后续变形的大小得到反映，后续变形小，则处理效果好；后续变形的大小与超载比和超载作用的时间有直接关系。针对超载预压加固方法，前人已做了诸多研究：张光永等^[5-6]针对单一软黏土层提出了软黏土的卸载控制曲线；李国维等^[7-8]通过不同超载比、不同超载作用时间的一维固结试验，在初始应力状态下直接加载到设计的超载水平，依此方法研究均质软土在超载作用过程的变形机制；曾国熙^[9]、潘秋元等^[10]提出，用等载及超载比计算出来的固结度控制卸载，但该方法只考虑了主固结变形忽略了次固结变形，卸载时间与主固结完成时间而密切相关；郝玉龙等^[11]分析了上部为硬壳层的双层地基超载预压的固结、沉降机制，给出了多级等速加、卸载条件下双层地基一维固结孔压解析解。目前的研究多集中在各单一土层地基或上部为硬壳层的上硬、下软的双层地基，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，导致理论研究还远落后于工程实践。

因此，针对真空预压处理后的吹填场区上软、下硬的双层软黏土地基超载预压研究的匮乏，本文将上层软黏土和下层正常沉积软土形成的双层软黏土地基作为一个完整体系展开研究，为探讨超载预压加固处理方法中超载比和卸载控制标准，拟采用改装的固结仪进行多种超载比和不同超载作用时间的室内试验，提出适宜天津滨海吹填场区地基土的超载预压控制标准。

2 试验情况简介

2.1 试验土样

土样取自天津滨海吹填场区地基土，上层为软

黏土；下层为正常沉积土。其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 soils

土性	密度 ρ /(g/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	1.76	50.3	30.10	58.5	33.8	1.340
粉质黏土	2.04	23.6	19.00	32.8	13.8	0.647

2.2 试验仪器设备

为探究吹填场区双层软黏土地基在超载作用过程中的变形特性，试验中制作成双层土样（上层为 2 cm 软黏土和下层为 2 cm 粉质黏土）；由于现有的单向固结仪只有一个百分表 1，只能测量双层试样的总沉降，故通过在上透水石、传压板侧边凿微孔，将另一百分表 2 的探针伸入至下层土上表面测量下层土沉降。

为防止百分表 2 探针与上层土接触，在其外部设置略大于百分表 2 探针直径的光滑圆管 1，管 1 底部与一小橡胶片固定在一起；试验时，将两者置于下层土表面，百分表探针底端伸至橡胶片位置，此外为避免管 1 与土样的摩擦，在管 1 外侧设置一直径略大于管 1 的圆管 2，管 2 底端自由，试验时管 1、管 2 和百分表探针杆穿过上层土、上透水石、传压板，管 1 外部和管 2 内部均匀涂抹凡士林以减少两管之间可能产生的摩擦，改装后的固结仪如图 1、2 所示。



图 1 改装后的单向固结仪
Fig.1 Modified oedometer

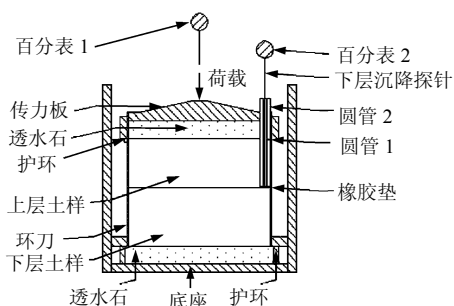


图 2 改装后的单向固结仪示意图
Fig.2 Schematic diagram of modified oedometer

2.3 试验方法

以相同两组 4 cm 高的软黏土试样为测试土样, 改装的固结仪测得的总沉降与未改装的固结仪所得总沉降的相对误差在 0.03% 以内, 根据土工试验规程, 可以认为, 改装后的固结仪不影响双层地基的总沉降。此外, 试验后将圆管 2 拔出土样时, 利用电子压力计测得管与土样间的摩阻力与土样的剪切力相比甚小。另设置了 4 组测试试验, 加载顺序均为 12.5、25、50、100、200、400、700 kPa, 分别在 1.2、6、12、24 h 后卸载, 待土样变形稳定后结束测试, 试验完成后切开的土样表明, 下层土在试验中最大压力作用下, 并没有出现挤压隆升现象, 可认为超载预压试验中所设置的压力不影响下层土变形测量的准确性。由此可以认为, 改装的固结仪可用于测量下层土沉降。

在制样过程中, 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》^[12]依次制备上、下层 2 cm 高的土样。制备双层土样时, 利用压样器将预先备好的上、下层土样, 依次压进 4 cm 高环刀中。

试验在固结仪上进行, 试样面积为 30 cm², 高为 4 cm (上、下土样各 2 cm)。试验时为使上、下层充分接触, 先施加 2 kPa 的预压荷载至稳定后卸载, 然后再正常加载, 每级荷载持续 48 h。卸载时间考虑主固结时间, 各级荷载下按卡氏法^[13]求取的主固结时间均小于 2.1 h (如图 3 所示, 虚线表示变形曲线上主、次固结分界点), 故将超载作用时间设为 4 类: 1.2、6、12、24 h, 其中后 3 者大于主固结时间。

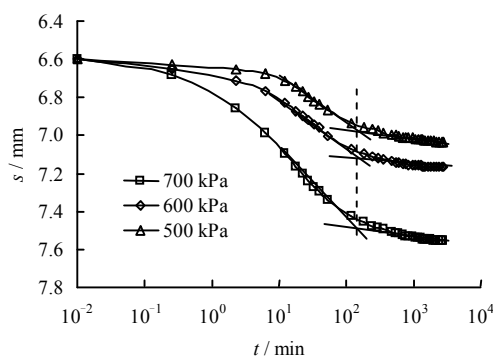


图 3 不同压力下的变形与时间关系曲线
Fig.3 Relationships between deformation and time under different pressures

2.4 试验方案

考虑到土样上覆土层的计算压力约为 300 kPa, 永久使用荷载 P_f 设定为 400 kPa。加荷等级为 12.5、

25、50、100、200、400 kPa, 400 kPa + P_s ; 其中 P_s 为超载, 超载与卸荷后永久使用荷载之比定义为超载比; $OPR = P_s / P_f$, 其中: OPR (over pressure ratio) 为超载比, P_f 为永久使用荷载, P_s 为超载。将超载比设为 0.250、0.375、0.500、0.625、0.750, 则 P_s 依次为: 100, 150, 200, 250, 300 kPa。为了与超载预压加固处理方法对比, 进行了无超载预压的对比试验, 具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案
Table 2 Test programs

超载作用 时间类型	超载比	加载历程 (荷载单位: kPa)
A (1.2 h)	0.250	12.5-25-50-100-200-400-500 (1.2 h) -400
	0.375	12.5-25-50-100-200-400-550 (1.2 h) -400
	0.500	12.5-25-50-100-200-400-600 (1.2 h) -400
	0.625	12.5-25-50-100-200-400-650 (1.2 h) -400
	0.750	12.5-25-50-100-200-400-700 (1.2 h) -400
B (6 h)	0.250	12.5-25-50-100-200-400-500 (6 h) -400
	0.375	12.5-25-50-100-200-400-550 (6 h) -400
	0.500	12.5-25-50-100-200-400-600 (6 h) -400
	0.625	12.5-25-50-100-200-400-650 (6 h) -400
	0.750	12.5-25-50-100-200-400-700 (6 h) -400
C (12 h)	0.250	12.5-25-50-100-200-400-500 (12 h) -400
	0.375	12.5-25-50-100-200-400-550 (12 h) -400
	0.500	12.5-25-50-100-200-400-600 (12 h) -400
	0.625	12.5-25-50-100-200-400-650 (12 h) -400
	0.750	12.5-25-50-100-200-400-700 (12 h) -400
D (24 h)	0.250	12.5-25-50-100-200-400-500 (24 h) -400
	0.375	12.5-25-50-100-200-400-550 (24 h) -400
	0.500	12.5-25-50-100-200-400-600 (24 h) -400
	0.625	12.5-25-50-100-200-400-650 (24 h) -400
	0.750	12.5-25-50-100-200-400-700 (24 h) -400

注: 12.5-25-50-100-200-400-500 (1.2 h) -400 表示: 分级加载, 除 500 kPa 外, 每级荷载持续 48 h, 加载至 500 kPa 时, 预压 1.2 h 后卸载至 400 kPa。

3 试验结果分析

3.1 超载比对双层软黏土变形的影响

图 4(a)~(d) 为双层土样在不同超载比 (0.250、0.375、0.500、0.625、0.750)、相同超载作用时间下的变形-时程曲线。为简化, 图中所给出的 500 kPa-400 kPa-1.2 h 表示 500 kPa 的超载预压 1.2 h 后卸载到 400 kPa 的等载水平, 继续固结至稳定; 400 kPa-48 h 表示无超载、等载水平下连续固结 48 h。

由图 4 可看出, 双层土样的变形-时程曲线可划分为 3 阶段: 快速变形阶段、变形趋稳阶段、卸荷回弹阶段。

(1) 快速变形阶段: 土样的变形迅速增大, 超载比越大, 变形量越大, 如图 4 (a) 所示, 超载预压 25 min 后, 在超载比为 0.250、0.375、0.500、0.625

时, 双层软黏土试样的变形依次为: 6.212、6.479、6.887、6.994 mm, 由此可知, 超载比从 0.25 增加至 0.50, 变形量增大了 11.5%。此外, 此时的变形量已占卸载时刻变形量的 90%以上。

(2) 变形趋稳阶段: 随着主固结的完成, 变形量随超载比的增大缓慢增加, 如超载预压 3 h 后, 超载比从 0.25 增加至 0.50, 即超载比增大一倍时, 变形量增大了 1.6%, 不到 25 min 时变形增加量的 1/10。此外, 土体进入超载预压变形趋稳阶段, 不同超载比下变形特征无明显差别。

(3) 卸荷回弹阶段: 变形曲线的斜率明显减缓, 超载比为 0.375 及其以上时, 与等载对应的变形相比, 双层地基卸载后以回弹变形为主, 后续变形明显减小。如超载预压时间为 6 h, 超载比为 0.500、0.625 时, 回弹量为 0.031、0.044 mm, 与无超载预压的固结相比, 后续变形减小幅度高达 70%以上。另外, 有超载参与的固结过程, 其总变形量大于永久荷载作用下的变形量, 且随超载比的增大而增大。例如, 超载预压 6 h 后卸载, 与无超载预压的变形相比, 各级超载比下变形量增加了 15%以上。

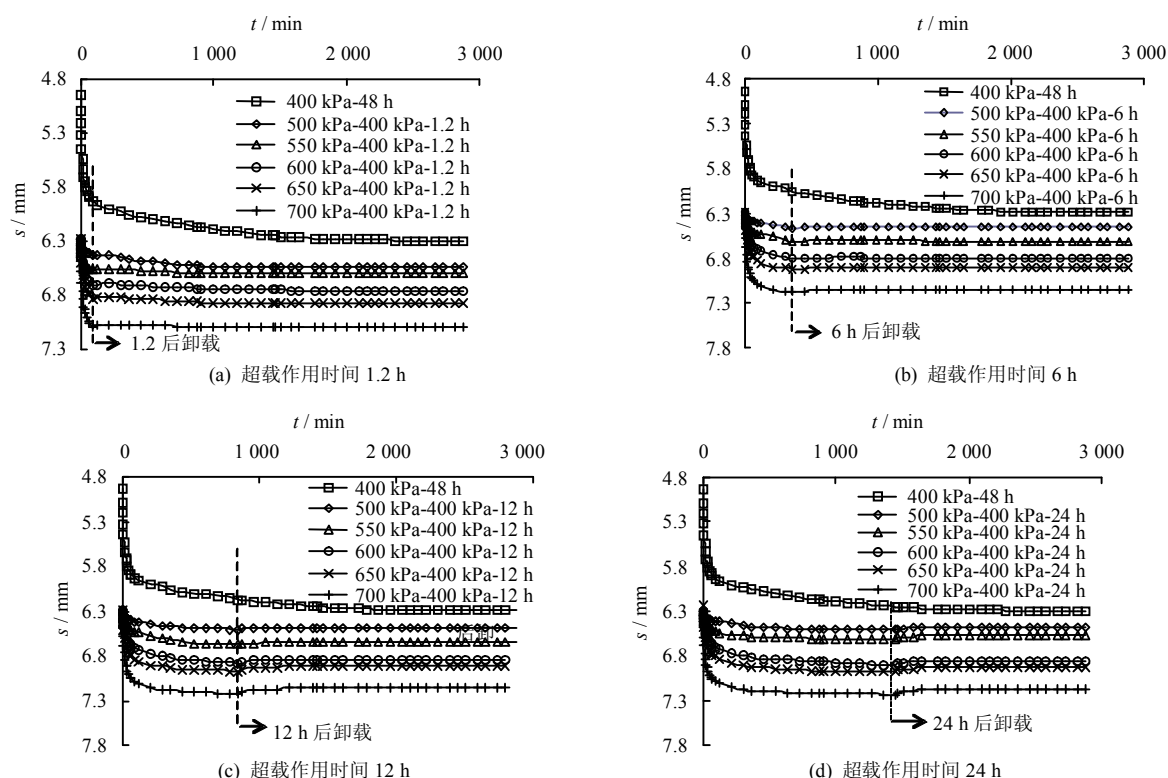


图 4 双层土样不同超载比下不同超载作用时间时的变形-时程曲线

Fig.4 Deformation-time curves of double layer soft clay samples of different overload durations for different overload ratios

图 5 为上层土样超载作用时间 6 h 时, 各超载比下的变形-时程曲线, 由图可知, 上层土样与双层土样的变形-时程曲线变化规律相同, 但随着超载比的增大, 变形量的增加幅度减小。例如, 超载预压 25 min 后, 超载比从 0.25 增大到 0.50 时, 变形量增加了 9.1%, 增加量比双层土样减小了 2.4%。在超载作用时间为 1.2、12、24 h 时, 土样的变形-时程曲线亦有相同规律, 此处不再赘述。

随后变形缓慢增加, 当超载水平达到 550 kPa 及其以上时, 上层土体的沉降曲线在卸荷回弹阶段出现明显反弹, 根据郝玉龙等^[14]提出的固结回弹变形理论, 分析其原因主要由于, 上层土体在卸载开始时刻, 土体中的有效应力状态大于永久荷载下的

有效应力, 土体处于超固结状态, 变形以回弹为主, 超载的卸除一方面将消除因土体没有固结稳定而残留的孔压, 产生负的超静孔隙水压力; 另一方面使土体内有效应力降低, 最终负的孔隙水压力逐渐消散于 0, 有效应力的降低量等于总卸载量中扣除残留孔压之后被土体承担的卸载量。

图 6 为下层土样超载作用时间为 1.2、6 h 时, 各超载比(0.250、0.375、0.500、0.625、0.750)下的变形时程曲线, 由图可知, 下层土样的变形曲线也具有明显的 3 阶段特征。但随着超载比的增大, 变形量增加的幅度小于双层和上层土样。如超载预压 25 min 后, 超载比从 0.25 增加到 0.50 时, 变形量增加了 6%, 变形量的增加幅度比双层土样小 5.5%,

比上层土样小 3.1%。

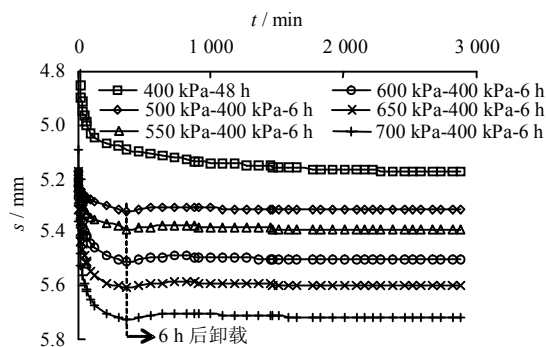
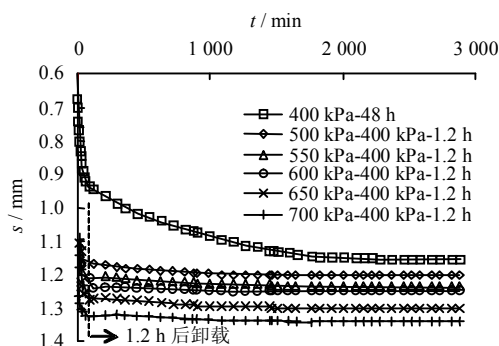
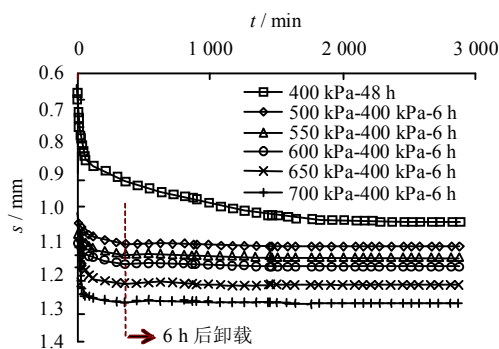


图5 上层土样超载作用时间 6 h 时的变形-时程曲线
Fig.5 Deformation-time curves of upper layer soft clay samples for an overload duration of 6 h



(a) 超载作用时间 1.2 h



(b) 超载作用时间 6 h

图6 下层土样不同超载比下不同超载作用时间时的变形-时程曲线

Fig.6 Deformation-time curves of lower layer soft clay samples of different overload durations for different overload ratios

在变形趋稳阶段, 变形缓慢增加, 进入卸荷回弹阶段时, 下层土体的变形显示了与双层、上层土样不同的变化规律。当超载比为 0.375, 超载作用时间小于 6 h 时 (限于篇幅原因, 超载作用时间为 12、24 h 的变形-时程曲线与双层试样相近, 此处不再罗列), 即约小于 3 倍的主固结时间时, 下层土体超载卸除后变形仍以固结为主, 这是由于在卸载开始时刻, 土体中的有效应力小于永久荷载下的有效应

力, 下层土体存在超静孔隙水压力, 卸载时刻, 土骨架来不及变形, 超载的卸去完全被水承受, 孔隙水压力的降低量等于超载的卸除量, 卸载过程使其总应力相应降低, 对其正常固结没有影响。由此可知, 当超载比小于 0.375、超载作用时间小于 3 倍的主固结时间时, 在双层地基中将出现上层土体处于超固结状态, 而下层土体处于正常固结状态。

对于超载卸除后的变形-时程曲线, 从各图的曲线形状可以看出, 同一超载作用时间下, 超载卸除后的变形线和等载预压的变形线相比, 斜率明显减缓, 即次固结系数减小。图 7 为超载预压 6 h 时超载比与次固结系数关系曲线, 由图可知, 曲线呈下降趋势且由陡变缓, 次固结系数随超载比的增大逐渐减小, 减小的幅度随超载比的增大而减小。各级超载比下的次固结系数逐渐减小, 分别为 2.98×10^{-3} 、 2.06×10^{-3} 、 1.47×10^{-3} 、 1.29×10^{-3} 、 1.12×10^{-3} , 相对于等载预压, 次固结系数的变化率分别为 58%、72%、78.3%、78.5%、79%, 也可看出, 在超载比 > 0.5 时, 卸载后的次固结系数变化幅度不大, 在其他超载作用时间下以及上层土或者下层土的变形-时程曲线中, 亦有相同结论。

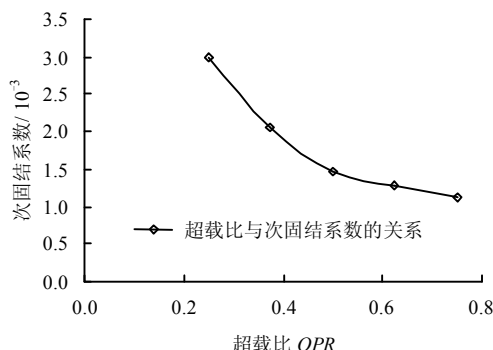


图7 超载预压 6 h 时超载比与次固结系数关系曲线

Fig.7 Relationship between overload ratio and secondary consolidation coefficient with an overload duration of 6 h

由以上分析可知, 实际工程中, 超载比不宜过大, 超载过大预压效果的提高并不明显, 适宜于天津滨海地区超载预压的超载比控制在 0.5 以下较为经济合理。

3.2 超载作用时间对双层软黏土变形的影响

图 8 为双层试样相同超载比、不同超载作用时间的变形-时程曲线, 图中每一超载比下含有 5 条不同超载作用时间的变形曲线, 变形曲线从上至下对应的超载作用时间依次为: 0、1.2、6、12、24 h。其中 1.2 h 小于试样的主固结时间, 其余大于试样的主固结时间。图 8(a)~(e)依次为双层试样超载为

100、150、200、250、300 kPa，即超载比为 0.250、0.375、0.500、0.625、0.750 的情况。

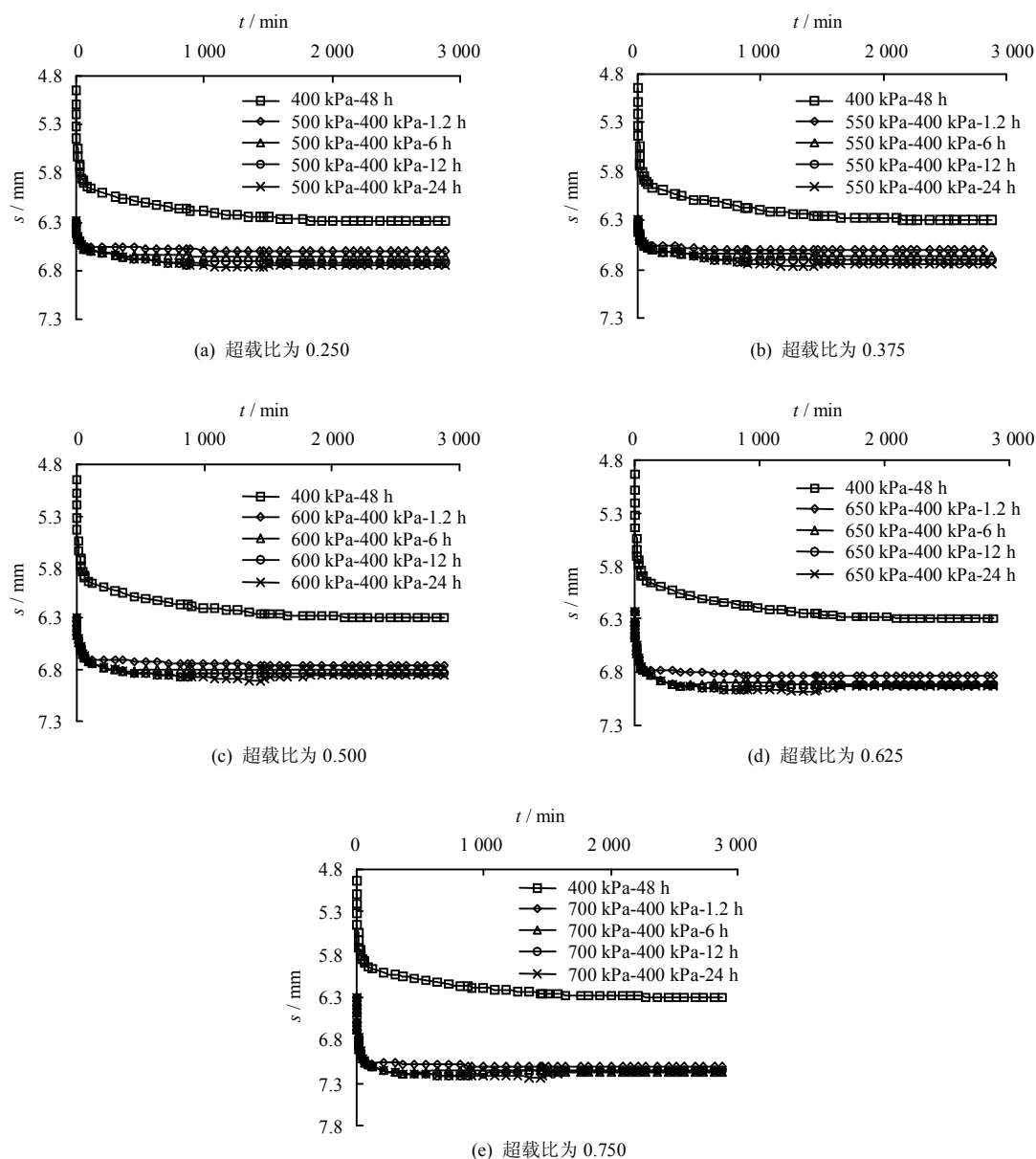


图 8 双层试样不同超载作用时间下不同超载比时的变形-时程曲线

Fig.8 Deformation-time curves of double layer soft clay samples of different overload ratios under different overload durations

从图 8(a)~(e)双层试样的变形-时程曲线可以看出，同一超载比下，不同超载作用时间下的变形曲线在卸载时间前、后具有明显的不同特性，双层土体在超载作用下变形显著增加，超载卸除后，变形减缓，同一超载比下，在不同的时间卸除超载后，次固结系数随着超载作用时间的增加而逐渐减小。如超载比为 0.5、超载作用时间为 1.2、6、12、24 h 时的次固结系数分别为 2.54×10^{-3} 、 1.47×10^{-3} 、 1.16×10^{-3} 、 1.03×10^{-3} ，可以看出，超载作用时间超过 1.2 h 时，次固结系数明显减小，由此说明，在实际工程中，超载作用时间超过主固结时间时，对减

小工后沉降有利。然而，超载的作用时间过长会增加地基的总沉降量，如图 8(d)所示，超载比为 0.625 时，预压 1.2、6、12、24 h 后卸载，双层软黏土试样的最终稳定变形依次为 6.041、6.721、6.873、7.086 mm，在实际工程中，将会增大因沉降所引起的填筑土方工作量，浪费人力物力，另外，4 者对应的最终稳定变形量增加的差值逐渐减小，依次为 0.580、0.122、0.113 mm，即在 4 类超载作用时间下，超载卸除后的变形曲线逐渐接近，由此说明，随着超载作用时间的增加，其对地基的处理效果的提高逐渐减缓，随着超载比的增大，这种现象更加

明显。

由图 8(b)超载比为 0.375 可知, 超载作用时间小于主固结时间时, 超载卸除后, 变形曲线还有明显的下降趋势, 说明预压时间过短, 预压效果不显著, 对减小工后沉降不利; 超载作用时间大于主固结时间时, 超载卸除后的变形曲线很接近, 预压 1.2、6、12 h, 卸载后稳定变形量间的差值, 前者高后者接近 3 倍。由此说明, 本次试验中当超载作用时间超过主固结时间且小于 6 h 时, 预压效果显著, 6 h 约为 3 倍的主固结时间, 即在实际工程中, 适宜于天津滨海地区的超载预压时间应控制在 1~3 倍的主固结时间内。

图 9 为超载比为 0.5 时, 上、下土层不同超载作用时间下的变形时程曲线, 不同超载作用时间下的变形曲线在卸载时间前后具有显著不同, 卸载后的变形增加幅度明显减小。此外, 超载作用 1.2 h 后, 超载比为 0.5 时, 卸载时双层地基总变形量为 6.869 mm, 上层土变形量为 5.529 mm, 由此可知, 上层土变形量占双层地基总变量的比例达 78%, 若以超载预压卸载时刻为时间参考点, 双层试样的总沉降分别为 0.041 mm, 其中下层土仅占 23.7%, 可见下层正常沉积土对双层地基的工后沉降影响较小, 上层压缩性高的软黏土对地基的变形影响较大, 工后沉降主要是由上层软黏土造成的。在其他超载

作用时间及超载比为 0.25~0.75 的组合下, 亦有相同结论。由此可知, 在吹填场区双层软黏土地基上采用超载预压法处理地基, 可以有效地控制上层软黏土造成的工后沉降, 加快地基稳定。

4 结 论

(1) 室内试验揭示双层软黏土地基超载比大于 0.375, 当超载作用时间超过主固结时间时, 工后沉降明显减小, 减小幅度高达 70%以上, 但地基总沉降量增大; 超载卸除后的土体次固结系数明显减小, 减小的幅度随超载比的增大、超载作用时间的增加而减小, 不同超载预压条件间, 次固结系数的减小差值最大可达 1.86 mm。

(2) 适宜天津滨海地区围海造陆工程软黏土地基的超载比应控制在 0.5 以下, 超载作用时间应控制在 1~3 倍的主固结时间内。

(3) 不同于上硬、下软的双层地基, 双层软黏土地基的工后沉降主要是上层软黏土的压缩造成的, 约占工后总沉降的 73%以上, 这种沉降的发展规律值得在今后的吹填场区软黏土地基设计中予以重视。

参 考 文 献

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
HUANG Wen-xi. The engineering properties of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983.
- [2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [3] 张开鹏, 熊燕文, 夏元友, 等. 超载预压加固软土路基效果数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 648—651.
ZHANG Kai-peng, XIONG Yan-wen, XIA Yuan-you, et al. Numerical analysis of surcharge preloading consolidation effects on soft foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Supp. 1): 648—651.
- [4] 张在喜. 超载预压加固软土路基现场试验研究[D]. 2003: 55—58.
ZHANG Zai-xi. Investigation on surcharge preloading for improved soft soil ground under expressway[D]. 2003: 55—58.
- [5] 张光永, 王靖涛. 超载预压法的卸载控制理论研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1250—1254.
ZHANG Guang-yong, WANG Jing-tao. Study on theory of unloading control of surcharge preloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1250—1254.

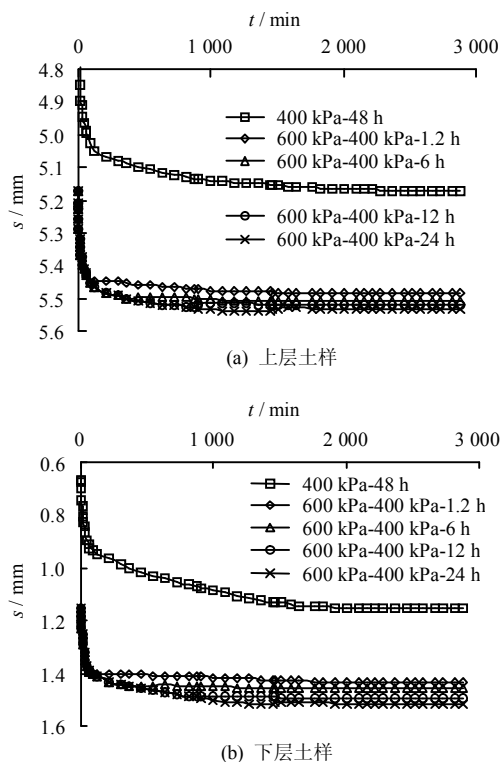


图 9 超载比为 0.5 时不同超载作用时间的变形-时程曲线
Fig.9 Deformation-time curves under different overload durations with overload ratio of 0.5