

文章编号: 1000-5013(2012)04-0435-05

天然沉积结构性软土的超载预压变形性状试验

曾 玲 玲¹, 陈 福 全¹, 郭 立 群²

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;
2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361012)

摘要: 通过对天然沉积土进行常规一维压缩试验和不同有效超载比下的超载预压一维压缩试验,分析超载预压作用下天然沉积土压缩变形性状. 研究表明:不同有效超载比预压作用下的竖向应变压缩历时曲线特征不同,预压过程主固结阶段的曲线斜率随着预压荷载的增大而增大,而次固结阶段的斜率却随着预压荷载的增大而减小;不同超载比预压作用后,超载作用延缓了次固结压缩变形发生的时间,超载比越大延缓的时间越长;延缓时间过后次固结压缩变形将重新发展,且随着对数时间的发展次固结系数呈先增大后趋于稳定的变化趋势.

关键词: 超载预压; 天然沉积土; 结构性; 压缩试验; 变形规律
中图分类号: TU 411 **文献标志码:** A

为了减少公路、码头和堤坝等建筑物地基的工后变形和不均匀沉降,超载预压处理是实际工程中经常采用的方法之一. 超载预压阶段所用的超出建筑物营运期荷载的增量值与营运期荷载的比值和超载固结时间,一直是超载预压研究的重点内容^[1-4]. 李国维等^[2]针对重塑土的超载预压一维压缩试验,得出超载预压的作用在于有效降低卸载后的次固结变形速率,且卸载再压阶段的次固结系数随时间的发展近似为常数;次固结系数随着再加荷压力的增大而增大,随着预固结压力的增大而减小. 然而,文献^[5-6]却得出天然沉积软黏土、泥炭土经超载预压且土体经历次回弹阶段后,土体的次固结系数随着时间的增长呈不断加大的变化规律,次固结系数加大的速度随着加载比的增大而减小. 众多研究者明确指出,由于长期沉积和沉积后过程形成的土结构性,天然沉积软土的压缩性状与重塑土有着本质的区别^[7-10]. 这不仅表现在主固结压缩性状的不同,蠕变及次固结性状也同样存在较大区别. 超载预压是软基上建造高速公路经常选择的一个地基处理方法,由于土结构性影响,目前已有的基于重塑土研究得出的超载预压对土体压缩性状的影响规律不适用于天然沉积土. 本文通过对天然沉积土进行一维压缩试验和不同超载比下超载预压一维压缩试验,研究超载预压对天然沉积土压缩性状的影响规律.

1 试样及试验方案

1.1 试样

试验所用的天然沉积土原状样取自于江苏连云港市临连高速公路工地 K50+237 孔,采用薄壁取土器获得地表以下 6 m 处的不扰动试样,有效上覆压力约为 50 kPa. 试样为高液限黏土,其物理指标:取土深度为 6 m;土的天然含水率(w)为 80.1%;液限含水率(w_L)为 86%;塑限含水率(w_p)为 31%;孔隙比(e_0)为 2.20;土粒相对密度(G_s)为 2.74;黏粒($<2\ \mu\text{m}$)质量分数为 40%.

1.2 压缩试验方案

为研究天然沉积土的常规一维压缩特性及经超载预压作用后的一维压缩特性,采用常规固结仪对试样进行常规一维压缩试验及不同有效超载比下的压缩试验,其方案如表所示. 表 1 中: R'_s 为有效超

收稿日期: 2012-03-10

通信作者: 曾玲玲(1983-),女,讲师,博士,主要从事土的基本特性、土的本构关系及地基处理技术的研究. E-mail: linglz413@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102168)

载比, $R'_s = \frac{\sigma'_{vs}}{\sigma'_{vf}} - 1$, σ'_{vs} 是超载卸除前能达到的最大有效应力, σ'_{vf} 是建筑物运营期的最终有效应力.

这里主要是对公路地基进行超载预压模拟试验,路堤填高荷载假定为 50 kPa,路面及车辆荷载假定为 25 kPa,土体天然沉积状态下的有效上覆压力约为 50 kPa,因此公路使用期试验土体承受的竖向压力为 125 kPa.

表 1 超载预压一维压缩试验方案
Tab. 1 Testing program for surcharging oedometer tests

试样编号	试验描述	加荷等级及持续时间
1 #	常规压缩	6.25 kPa-12.5 kPa-25 kPa-50 kPa-100 kPa-200 kPa-400 kPa-800 kPa-1 600 kPa, 每级荷载持续 1 d
2 #	无超载	25 kPa(1 d)-50 kPa(1 d)-125 kPa(20 d)
3 #	$R'_s=0.2$	25 kPa(1 d)-50 kPa(1 d)-150 kPa(1 d)-100 kPa(2 h)-125 kPa(25 d)
4 #	$R'_s=0.4$	25 kPa(1 d)-50 kPa(1 d)-175 kPa(1 d)-100 kPa(2 h)-125 kPa(27 d)
5 #	$R'_s=1.0$	25 kPa(1 d)-50 kPa(1 d)-250 kPa(1 d)-100 kPa(2 h)-125 kPa(27 d)
6 #	$R'_s=1.4$	25 kPa(1 d)-50 kPa(1 d)-300 kPa(1 d)-100 kPa(2 h)-125 kPa(25 d)
7 #	$R'_s=2.0$	25 kPa(1 d)-50 kPa(1 d)-375 kPa(1 d)-100 kPa(2 h)-125 kPa(27 d)

2 天然沉积土的压缩性状

研究超载预压对天然沉积土压缩性状的影响,必须先明确天然沉积土在正常固结状态下的压缩性状.通过常规一维固结仪,对原状样和重塑样进行加荷等级为 6.25~1 600 kPa,加荷比为 1,每级荷载持续 1 d 的压缩试验,获得的 $e-\log \sigma'_{\nu}$ 压缩曲线,如图 1 所示.

从图 1 可知:所用试样为典型的天然沉积结构性土,原状土的 $e-\log \sigma'_{\nu}$ 压缩曲线位于重塑上方,且区别于重塑土近似线性的特征,而呈典型的倒“S”特征.根据 Casagrande 法得到的固结屈服压力约为 80 kPa,高出原位状态的有效上覆压力 30 kPa.从图 1 还可知:当固结压力小于固结屈服压力时,原状土的压缩性较小;当固结压力大于固结屈服压力后,土体的压缩性显著增大,且大于重塑土的压缩性,而随着固结压力的增大,原状土的压缩性减小并趋于与重塑土的压缩曲线一致.已有研究指出^[8-9],图 1 所表现的原状土区别于重塑土的压缩性状,源于土体天然沉积状态所形成的土结构性,结构性的影响必然导致超载预压对原状土压缩性状的影响规律有别于重塑土.

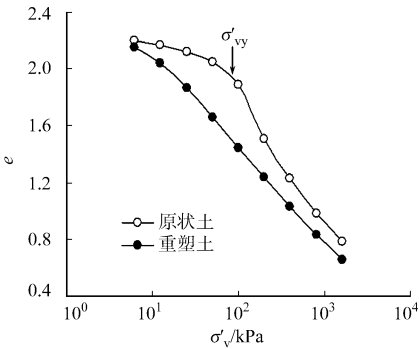


图 1 试样的常规一维 $e-\log \sigma'_{\nu}$ 压缩曲线
Fig. 1 Normal one-dimensional compression $e-\log \sigma'_{\nu}$ curve of samples

3 超载预压对压缩性状的影响

3.1 超载过程对压缩历时曲线的影响

不同超载比超载预压、卸荷和再加载整个过程的竖向应变压缩历时曲线,如图 2 所示.图 2 中,超载预压过程均控制为 24 h(1 440 min),保证了超载过程的固结度为 100%,达到所设定的有效超载比.试验过程中,设定超载预压前一级荷载为土样原土上覆压力 50 kPa,将计算竖向应变所用的土样初始高度设定为 50 kPa 固结稳定时土样的高度,而由于是侧限一维压缩试验,故文中所指应变均为竖向应变.

从图 2 可知:无超载作用及不同超载比预压作用下的天然沉积土的沉降历时曲线特征存在显著区别,而且超载预压阶段、卸荷阶段,以及再加载阶段沉降历时曲线的差别特征也有所不同.为更为清晰地描述 3 个阶段沉

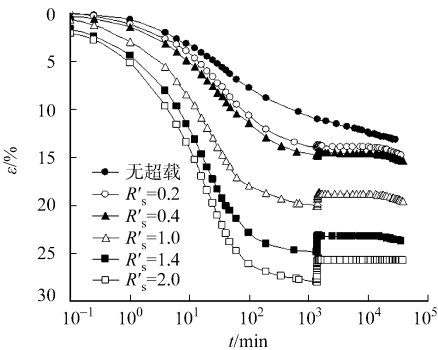


图 2 超载预压和卸荷及再加载过程的应变历时曲线
Fig. 2 Strain versus logarithm of time curve under surcharging-unloading and reloading

降历时曲线特征,绘制了不同预压荷载下的预压过程应变历时曲线,如图 3 所示. 卸荷至 100 kPa(2 h)再加载至 125 kPa(20 d)过程,其应变增量历时曲线如图 4 所示. 对图 3 的沉降历时曲线用 Cansagrand 法界定其主固结和次固结过程,可以看出主固结阶段的曲线斜率随着荷载的增大而增大,而次固结阶段的斜率却随着预压荷载的增大而减小. 这一结果与已有关于天然沉积土的主、次固结特性的研究成果^[10]是相吻合的. 将图 4 中卸荷回弹阶段回弹应变历时曲线进入稳定阶段的拐点定义为主回弹完成时间 t_{pr} ^[6]. 从图 4 可知:2 h 的回弹时间基本保证了每个试样主回弹的完成.

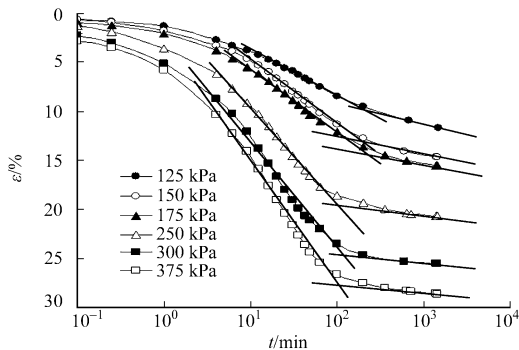


图 3 不同预压荷载下的应变历时曲线

Fig. 3 Strain versus logarithm of time curve under different surcharge pressure

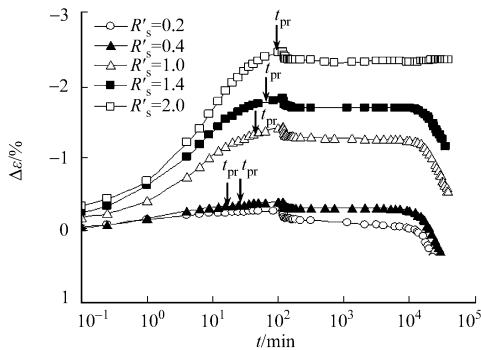


图 4 卸荷和再加载过程的竖向应变增量历时曲线

Fig. 4 Strain increment versus logarithm of time curve under unloading and reloading

试样所需的主回弹时间随着有效加载比的增大而增大,且在对数时间坐标中主回弹时间的增大趋势随加载比的增大而减小,如图 5 所示. 主回弹应变变量在超载比为 0.2 和 0.4 时较小,随着加载比的增大主回弹应变变量增大趋势有所加大,如图 6 所示.

需要注意的是,图 4 天然沉积土超载预压后的沉降历时曲线,明显区别于文献[2]所描述的重塑土经超载预压后呈现稳定且较小次固结变形速率的规律. 图 4 中再加载时产生瞬时较小的压缩变形后,应变变量稳定于某一值较长一段时间,再加载阶段经历一段不变形阶段后又进入压缩变形加大阶段. 在超载比为 0.2 和 0.4 及卸荷和再加荷 25 d 后,应变增量已超过正的 0.5%,即压缩量超过了之前产生的回弹量;在超载比为 1 时及卸荷再压 25 d 后的压缩量也接近于回弹量. 因此,天然沉积土经过超载预压之后的次固结变形是不可忽略的,这与文献[2]所描述的重塑土超载预压作用后的次固结变形规律存在本质的区别. 文献[3]所提出的超载比大于 0.33 后续变形以回胀为主,或超载比小于 0.33 但只要超载作用的时间足够长,超载卸除后地基的后续变形仍会以回胀变形为主的现象,对于天然沉积土结构性土也不适用.

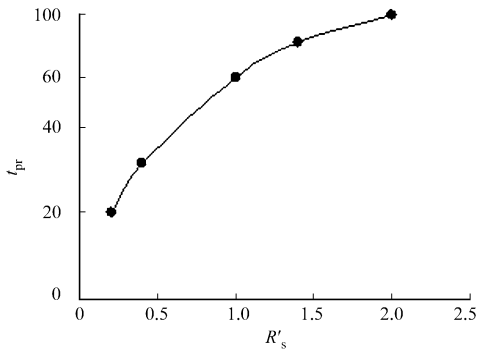


图 5 主回弹完成时间与有效超载比关系

Fig. 5 Relationship between primary rebound time and surcharge and effective surcharge ratio

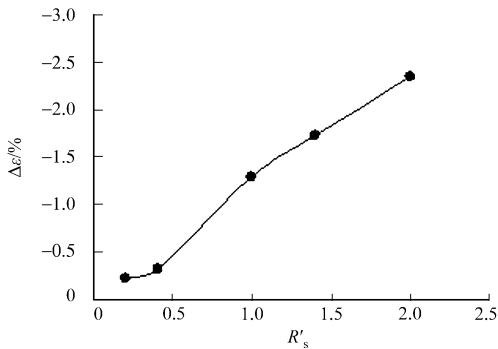


图 6 主回弹应变变量与有效超载比关系

Fig. 6 Relationship between primary rebound strain and effective surcharge ratio

3.2 超载预压对次固结影响

再加载阶段,不同孔隙比随时间的变化规律及次固结系数随时间的变化规律,如图 7 所示. 定义 $e-\log t$ 关系曲线次固结部分的斜率($\Delta e/\Delta \log t$)为次固结系数 C_α . 从图 7 可知:不同超载比预压作用后,超载作用仅延缓了次固结压缩变形发生的时间,但延缓时间过后次固结压缩变形将重新发展. 次固结变形

的延缓作用主要是由于土体在卸载后回弹需要一定时间,卸除超载时,由于土骨架的回弹作用,软黏土中将产生负孔隙水压力,外界水分要不断渗进软黏土孔隙,直至达到新的水力平衡.此外,平衡时间随着超载比的增大而增大,次回弹过后进入次固结压缩阶段,次固结系数随着时间的发展而增大.

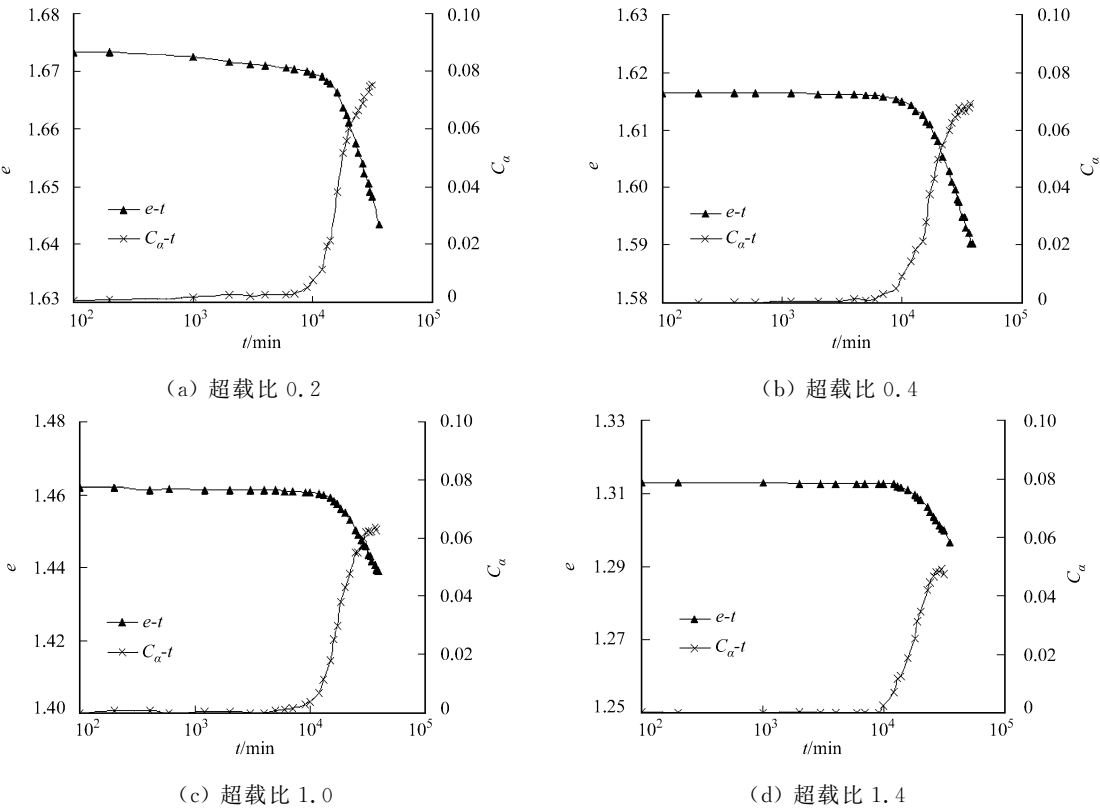


图 7 再加荷阶段孔隙比及次固结系数随时间的变化

Fig. 7 Void ratio versus logarithm of time curve under reloading with different surcharging ratios

进一步对比不同有效超载比预压作用且卸载后,再加载阶段次固结系数随着对数时间的变化规律,如图 8 所示.文献[2]通过重塑土超载预压作用后的次固结试验结果分析得到次固结系数预测方法为

$$C_a = \frac{1}{\alpha + \beta(1 + R'_s)} \tag{1}$$

式(1)中: α, β 为双曲线关系定值参数.式(1)所预测的重塑土在一定预压荷载超载作用卸载后,其次固结系数为定值,不随时间发生变化,且超载比越大次固结系数越小.然而,图 8 的结果表明:天然沉积土超载预压后的次固结系数随着时间的发展而增大,超载比越小次固结系数增大趋势越大;随着时间的发展,次固结系数逐渐趋于稳定,在有效超载比为 2 时,再加荷阶段在试验所观察的时间内未出现次固结压缩变形.因此,式(1)基于重塑土试验结果得出的预测公式必然不能适用于图 8 天然沉积结构性土的试验结果.

4 结论

已有研究表明:超载预压作用能有效地降低重塑土卸载后的次固结变形速率,一定超载预压荷载作用后,重塑土的次固结系数为定值,不随时间发生变化,且超载比越大次固结系数越小.通过对天然沉积土进行常规一维压缩试验和不同有效超载比预压作用下的一维压缩试验,结果表明:天然沉积土由于受结构性影响,使得其超载预压作用下的压缩变形规律区别于已有重塑土试验研究得出的压缩变形规律.

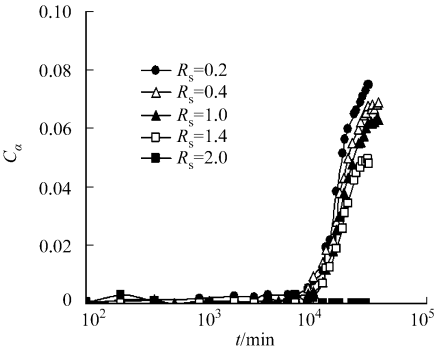


图 8 不同超载比预压后再加载阶段次固结系数随时间的变化

Fig. 8 Coefficient of secondary consolidation versus logarithm under reloading with different surcharging ratios

无超载作用及不同超载比超载预压作用下,天然沉积土的沉降历时曲线特征明显不同;不同超载预压荷载作用下,主固结阶段的 $\epsilon\text{-log } t$ 关系曲线斜率随着预压荷载的增大而增大,而次固结阶段的斜率却随着预压荷载的增大而减小。

预压卸载后,试样所需的主回弹时间随着有效超载比的增大而增大,主回弹应变量随着加载比的增大而增大;有效超载比较小时,卸载产生的回弹量要小于后续变形产生的压缩量。

超载作用仅延缓了次固结压缩变形发生的时间,超载比越大延缓的时间越长,延缓时间过后次固结压缩变形将重新发展;超载比越小,次固结系数增加越快,随着时间的发展次固结系数逐渐趋于稳定。

参考文献:

[1] Jr ALDRICH H P. Precompression for support of shallow foundations[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 1965, 91(2): 5-20.

[2] 李国维, 盛维高, 蒋华忠, 等. 超载卸荷后再压缩软土的次压缩特征及变形计算[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 118-123.

[3] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521-526.

[4] 张光永, 王靖涛, 徐辉. 超载预压法的超载比及卸载控制研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2003, 20(4): 37-39.

[5] MESRI G, STARK T D, AJLOUNI M A, et al. Secondary compression of peat with or without surcharging[J]. Geotechnical Engineering, ASCE, 1997, 123(5): 411-421.

[6] FENG Tao-wei. Compressibility and permeability of natural soft clays and surcharging to reduce settlements[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1991.

[7] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 329-378.

[8] 洪振舜, 刘松玉, 于小军. 关于结构土屈服破坏的探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 684-687.

[9] LEROUÉIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 467-488.

[10] 曾玲玲, 洪振舜, 刘松玉, 等. 天然沉积结构性土的次固结变形预测方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3136-3146.

Experimental Study on Deformation Behavior of
Surcharge Preloading for Soft Natural Clays

ZENG Ling-ling¹, CHEN Fu-quan¹, GUO Li-qun²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to investigate the deformation behavior of natural clays under surcharge preloading, the one-dimensional compression tests were conducted with different surcharge pressure ratios, different preloading durations and unloading durations. The test results indicate that: the curve between vertical strain and consolidation time varies with surcharge pressure ratio; with the increase of surcharge pressure, the slope of the curve increases during primary consolidation; decreases during the secondary consolidation, the larger the surcharge pressure ratio causes the longer delayed duration; when the consolidation time exceeds the delayed duration, the secondary consolidation develops, and the coefficient of secondary consolidation increases initially and then stabilizes with time.

Keywords: surcharge preloading; natural clays; soil structure; compression test; deformation behavior

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)