

软土一维次固结特性试验研究

沈大庆¹ 于永堂¹ 侯晓亮²

(1. 机械工业勘察设计研究院, 陕西西安 710043; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009)

【摘要】 基于南京河西地区原状和重塑软粘土的一系列一维次固结试验, 探讨了预压荷载、加荷比、加荷方式对重塑软土次固结系数的影响以及原状土的次固结变形特征。试验结果表明: 当荷载小于预压荷载时, 预压能明显减小次固结系数, 反之, 预压对次固结系数的影响不明显; 加荷比对次固结系数的影响明显, 次固结系数随加荷比的增大而增大; 分级加荷对应的次固结系数要大于分别加荷所对应的次固结系数; 该地区原状土的蠕变属于衰减蠕变。

【关键词】 软土; 主固结; 次固结; 次固结系数

【中图分类号】 TU 411; TU 447 **【文献标识码】** A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2011. 02. 004

Experimental Study on One-dimensional Secondary Consolidation Characteristics of Soft Clay

Shen Daqing¹ Yu Yongtang¹ Hou Xiaoliang²

(1. CHINA JIKAN Geotechnical Institute, China; 2. Institute of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

【Abstract】 Based on a series of 1D secondary consolidation tests for natural and remolded soft clay samples at Hexi region in Nanjing, the pre-pressure, the load ratios and the loading methods on secondary consolidation properties of remolded samples and deformation characteristics of the natural samples have been researched. The results show that the pre-consolidation pressure can significantly reduce the secondary consolidation coefficient when the consolidation pressure is less than pre-pressure. Otherwise, the effect of pre-pressure on the secondary consolidation coefficient is not obvious. Increase of the load ratios is able to increase the secondary consolidation coefficient. The corresponding secondary consolidation coefficient of the step loading is greater than the separate loading. The creep deformation of natural samples in the region has the character of decay slowly.

【Key words】 soft clay; primary consolidation; secondary consolidation coefficient; deformation

0 引言

我国沿海、沿湖、沿江地区存在大量的软土, 通常具有含水率高、孔隙比大、承载力低、压缩性高和流变特性强等特点, 易造成沉降过大或不均匀沉降、整体和局部失稳等问题。次固结沉降是在孔压消散, 有效应力不变或主固结沉降完成后, 超静孔隙水应力接近为零的条件下, 产生的长期蠕变变形^[1]。在软土地区进行工程建设时, 若软土作为主要持力层, 会使地基产生较大沉降量, 且沉降稳定历时长, 若忽略次固结沉降, 总沉降的计算结果与实际值往往产生较大误差。因此, 软土的次固结问题必须在

工程中加以考虑。

关于软土次固结变形问题的研究, 国内外学者做了大量的研究。Bjerrum^[2]指出土体在受荷之后便会产生次压缩变形, 而不只是在主固结结束后产生。Mesri 等^[3,4]认为次固结系数与荷载的增量比无关, 但取决于最终固结压力, 通过超载预压可以减小次固结系数, 其减小的程度与超固结比有关。刘世明等^[5]认为次固结变形在总变形中的比例并非常数, 它与荷载增量比有关, 荷载增量比越大, 其值越小。张军辉等^[6]对连云港软黏土的次固结系数试验表明, 次固结系数与固结压力无关, 预压不但能

减小次固结系数,还能延长次固结发生的时间,从而减小软基在一定时间内的固结变形,并认为连云港软黏土次固结系数与压缩指数的比值为一个常数,并且受加荷比影响不大。侯晓亮等^[7]认为淤泥质粉质粘土的蠕变变形具有逐渐衰减的特点,重塑土样次固结系数要小于原状土样,且不受荷载影响。可见,土的次固结变形是一个相对复杂的问题,工程性质变化较大。本文根据室内原状和重塑土一维次固结试验,重点探讨重塑软土的次固结系数随预压荷

载、加荷比、加荷方式等的变化规律。

1 试验概况

试验土样取自南京河西地区滨江大道旁,该处位于长江东侧凸岸,地貌单元上属于长江漫滩,漫滩相沉积土质极为软弱,且分布极不均匀。对于公路、地铁等长距离、大跨度工程而言,易产生较大的不均匀沉降。试验土样为淤泥质粉质粘土,比重为 2.72,取土深度和土样的其它基本物理性质指标见表 1。

表 1 土样的基本物理指标

编号	土样类别	取土深度 /m	含水量 $w/\%$	密度 $\rho/(g \cdot cm^3)$	孔隙比 e_0	塑性指数 $I_P/\%$	液性指数 I_L
①号					1.033		
②号					1.042		
③号	重塑	17	41.6	1.85	1.036	14.5	1.13
④号					1.048		
⑤号					1.052		
B06	原状	6	38.4	1.85	1.082	14.2	1.25
B10		10	38.6	1.81	1.078	14.9	1.23

本次试验按《土工试验方法标准》^[8](GB/T 50123-1999)进行一维固结蠕变试验。为减少温度对试验结果的影响,试验过程调节室内温度在 20℃±2℃的范围内。试验压力范围为 12.5~800 kPa,为了得到对照的试验数据,每级荷载都持续到第 7 天。其中①、②号采用分别加荷;③、④号加荷比为 $\Delta p_i/p_i=3$ 和 $\Delta p_i/p_i=1$;⑤号在 200 kPa 下预压 1 d 后分级加载。

2 试验成果及分析

次固结系数是反应土体次压缩特性的一个

重要参数,国内外学者对次固结系数提出了多种定义和计算方法^[9,10]。本文根据孔隙比与时间的对数关系曲线进行求解,即 $e-1gt$ 曲线在第二个折线段的斜率作为次固结系数,计算公式见式(1)。

$$C_\alpha = \frac{e_1 - e_2}{1g(t_1/t_2)} \quad (1)$$

式中: t_1 为主固结完成时间; t_2 为从加载开始起算的时间;, e_1, e_2 为对应于 t_1, t_2 时土体的孔隙比。本次试验次固结系数结果见表 2。

表 2 次固结系数结果汇总

荷载/kPa	12.5	25	50	100	200	400	800
①号		0.0019					
②号					0.0025		
③号		0.0023	0.0028	0.0039	0.0046	0.0036	
④号	0.0017		0.0033		0.0048		0.0046
⑤号	0.0001		0.0018		0.0050		0.0048
B06		0.0012	0.0018	0.0027	0.0057	0.0051	
B10		0.0025	0.0031	0.0040	0.0052	0.0049	

2.1 预压荷载对重塑土次固结系数的影响

试验对⑤号重塑土样首先在 200 kPa 下进行预压处理,在双面排水的情况下,先预压 24 h,然后卸荷回弹 24 h,再进行逐级加载。预压和不预压土样的次固结系数随荷载变化的曲线见图 1。通过④、

⑤号土样的试验结果对比可知,次固结系数随压力的增加,先快速增加后缓慢降低;当压力小于预压荷载时,预压均能明显降低次固结系数,当荷载超过预压荷载后,预压对次固结系数的影响不明显。上述现象的产生是由于土体经预压后,在相应荷载下已

经完成了一部分次固结变形,当固结压力小于预压荷载时,土体处于超固结状态,预压试样的次固结系数要明显小于未预压试样。因此,通过预压方式可明显的减少该处重塑软土的次固结沉降。

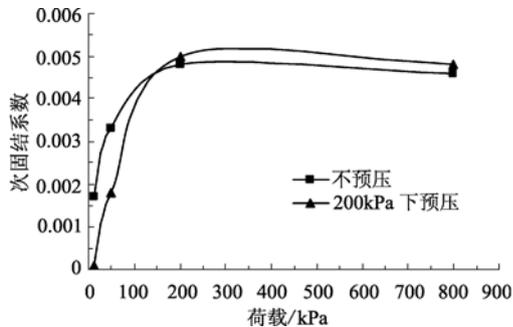


图1 预压对重塑土次固结系数的影响

2.2 加荷比对重塑土次固结系数的影响

试验对③、④号重塑土样分别进行了加荷比 $\Delta p_i / p_i = 3$ (加荷顺序为:12.5 kPa、50 kPa、200 kPa、800 kPa) 和 $\Delta p_i / p_i = 1$ (加荷顺序为:25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa) 两种情况下的次固结系数试验,均采用分级加载,每级荷载加压时间为7 d。不同加荷比时,荷载与次固结系数的关系的关系曲线见图2。可见,相同荷载时,加荷比越大,次固结系数也越大,重塑软土的次固结效应也越突出;当荷载小于200 kPa时,次固结系数的差距较小,超过该值后,加荷比对次固结系数的影响更为明显。

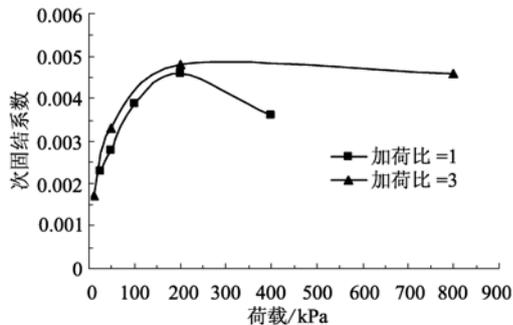


图2 加荷比对重塑土次固结系数的影响

2.3 加荷方式对重塑土次固结系数的影响

对重塑土样进行了分别加荷(编号①、②)和分级加荷(编号③)下对比试验结果见图3。分别加荷得到的次固结系数明显小于分级加荷对应荷载下的次固结系数;上一级荷载作用下的变形会影响下一级荷载作用下的变形,这个作用是使下一级荷载下的次固结系数增大。试验发现分别加荷时瞬时变形量随着固结压力的增加而增加,而分级加荷时由于固结效应的影响,瞬时变形增量越来越小;分别加荷下的长期变形较明显,而分级加荷下几乎无长期变

形,表明分别加荷可以更好的反映土体的次固结特性,但分级加荷更符合工程施工过程中载荷逐渐增加的动态过程。

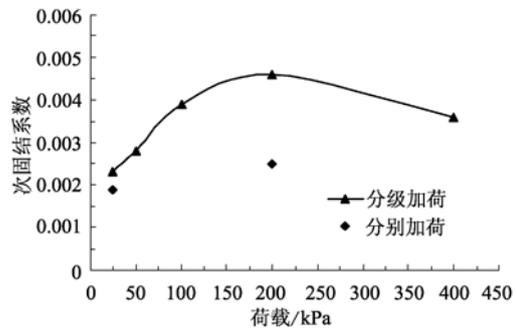


图3 加荷方式对重塑土次固结系数的影响

2.4 蠕变变形与时间的关系

B10 原状土在不同应力作用下竖向应变与时间的关系见图4。在较低的竖向压力作用下,蠕变变形量较小,但随着竖向荷载增大,蠕变变形量也随之增加,这说明软土的蠕变变形与应力水平有关,应力水平越高,蠕变变形量越大。在较低的竖向应力作用下,蠕变曲线只出现蠕变的第一阶段,蠕变具有衰减特征,变形速率最终趋于零,变形值最终趋于稳定。在较高荷载作用下,蠕变曲线表现了第一阶段和第二阶段,即衰减蠕变阶段和稳定蠕变阶段,变形速率最终趋于常数。本次试验过程中,蠕变变形曲线上没有出现急剧流动阶段,也没有过渡到破坏阶段,说明该地区的软土的蠕变在不是很高的应力水平下,属于衰减蠕变。

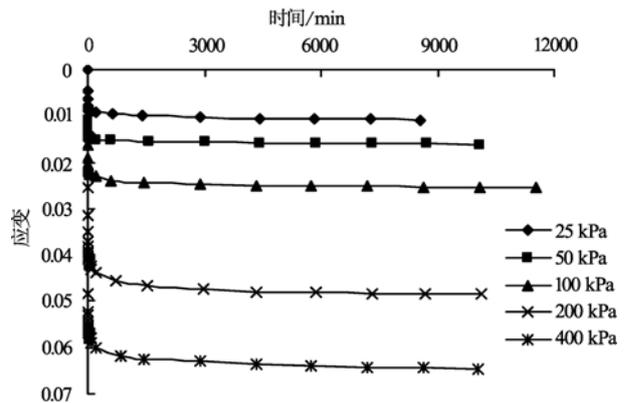


图4 应变与时间关系

研究表明该处软土蠕变应变与时间之间关系采用对数型 $\epsilon(t) = a \ln t + b$ 拟合,相关性较好。表3列出了6 m和10 m深度的原状土样在100 kPa和200 kPa荷载作用下拟合参数a、b值,B10原状土样在100 kPa下的拟合结果见图5。曲线与原数据的相关系数 R^2 均大于0.97,体现出较好的相关性。

表3 拟合结果

编号	压力	a	b	R ²
B06	100kPa	0.0006	0.0203	0.994
	200kPa	0.0014	0.0361	0.9735
B10	100kPa	0.0010	0.0475	0.9770
	200kPa	0.0007	0.0556	0.9971

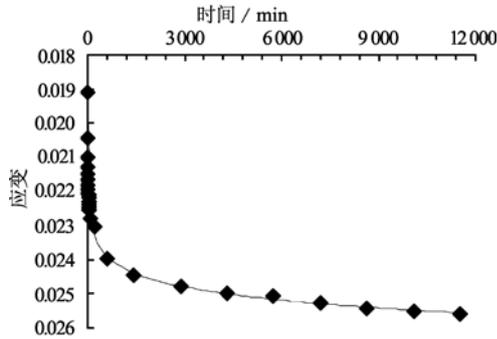


图5 应变与时间关系的对数拟合

2.5 孔隙比与时间对数关系

B10 原状土在不同竖向应力作用下孔隙比与时间对数的关系见图6。试验初始阶段,变形速率很大,曲线坡度较陡,一段时间后,变形速率急剧变小,曲线坡度变平缓。虽然主固结和次固结伴随着压缩变形的整个过程,但可由曲线的变化趋势判断主固结变形和次固结变形在何时占主导地位,即利用应变与时间对数关系曲线上的转折点所对应的时间作为主固结变形与次固结变形在何时占主导地位的分界时间。确定了分界时间以后,即可以得到次固结变形量在全部变形量中占的大体比例。比较图5中的五条曲线可知,次固结变形占全部变形量的比例与应力水平有关,次固结变形量在全部变形中所占的份额随应力水平的提高而增大,但总的来说,次固结变形量在全部变形量中所占的比例不大。

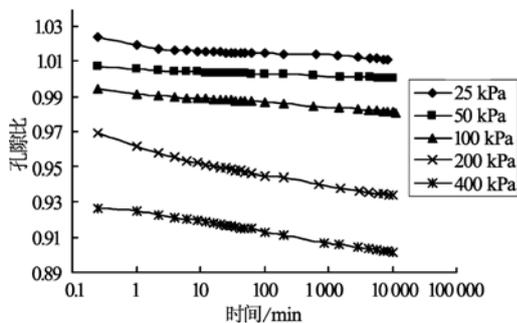


图6 孔隙比与时间对数关系

3 结论

南京河西地区的淤泥质粉质粘土层主要软粘土,分布范围广,工程性质差,在长期荷载作用下容

易产生次固结变形。本文通过对南京河西地区的淤泥质粉质粘土原状和重塑土的次固结系数与预压荷载、加荷比、加荷方式的关系,得到了一些规律性的认识:

1) 预压荷载对重塑土的次固结系数的影响主要表现在,当固结应力小于预压应力时,预压能明显减小次固结系数,但是当固结压力大于预压荷载时,预压对次固结系数的影响不明显;

2) 加荷比对重塑土的次固结系数的影响较明显,次固结系数随加荷比的增大而增大;

3) 加荷方式对重塑土的次固结系数影响明显,分级加荷对应的次固结系数要大于分别加荷所对应的次固结系数。

4) 通过对试验数据的拟合分析,南京河西地区淤泥质粉质粘土原状土的应变与时间关系能较好的符合形如 $\epsilon(t) = a \ln t + b$ 的对数函数关系,且蠕变变形具有衰减蠕变的特点。

参 考 文 献

- [1] 余湘娟,殷宗泽,董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 29(6): 913-916.
- [2] Bjerrum L. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings[J]. Geotechnique, 1967, 17(2): 83-118.
- [3] Mesri, Godlewski. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1977, 103(5): 1977, 417-430.
- [4] Mesri, G. & Castro. The C/Cs concept and K0 during secondary compression[J]. J. Geotech. Engng, 1987, 113(3): 230-247.
- [5] 刘世明,曾国熙. 软粘土的次固结变形特性[J]. 浙江大学学报, 1990, 24(6): 840-848.
- [6] 张军辉,缪林昌,黄晓明. 连云港软粘土次固结变形研究[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 116-119.
- [7] 侯晓亮,赵晓豹,李晓昭. 南京河西地区软土次固结特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 888-892.
- [8] 土工试验方法标准(GB/T50123-1999). 中华人民共和国国家标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [9] 高彦斌,朱合华,叶观宝,等. 饱和软粘土一维次压缩系数 Ca 值的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 459-463.
- [10] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996.

收稿日期:2011-02-17