

上海第④层淤泥质黏土的次固结试验研究

杭荟旻

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 上海滨海平原地基土遍布第④层灰色淤泥质黏土, 常见厚度 5~10 m, 是主要的软弱土层。对于具有明显流变特征的黏土, 次固结变形是产生工后沉降的主要原因, 不容忽视。为了研究该层土的次固结, 进行了 10 组原状土样的次固结试验。试验表明: 该层土的次固结系数在 $4.14 \times 10^{-3} \sim 9.88 \times 10^{-3}$ 之间, 同时与压缩指数的比值范围为 0.017~0.028, 说明次固结系数与压缩指数基本呈线性关系。研究成果对第④层淤泥质黏土的次固结特性的理解有一定的指导意义。

关键词: 淤泥质黏土; 次固结; 次固结系数; 压缩指数

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)05-0206-03

0 引言

次固结是指由土中超孔隙水压力消散主固结结束后, 有效应力基本稳定的条件下, 因土粒表面的结合水膜蠕变和土颗粒结构重新排列等引起的较为缓慢的变形。沿海的软土存在着显著的次固结特性, 它是一个随时间发展的长期固结。特别是深厚的流塑状软黏土, 工程特性差, 处理困难, 次固结变形较大。比如京津唐高速公路在运营后每年仍有约 1.0~1.5 cm 的沉降变形量。天津市经济技术开发区在大面积填土堆载作用下, 目前每年仍有 1.0 cm 左右的沉降。随着深厚软土地基上工程建设的迅速发展, 由次固结变形引起的工后沉降不容忽视^[1]。前人对软黏土的次固结特性的分析研究, 如应力历时、固结压力、软黏土类型等对次固结系数的影响, 为我们后续工程实践提供了很多理论依据。

在荷载作用下, 土体的沉降通常由瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降 3 部分组成。以孔隙水压力消散为依据的经典太沙基固结理论未考虑次固结导致的沉降。许多学者不断地研究这个问题, 建立了一些次固结数学模型, 但是成果比较复杂, 且参数很难用常规试验确定。如果压缩土层的厚度为 H , 显然 t 时间地基的次固结沉降估算公式可采用 $S_s = C_\alpha / (1 + e_0) \times \lg(t/t_c) \times H (e_0 \text{ 试验初始孔隙比})$ ^[2]。这就意味着次固结系数与次固结沉降的影响成正比关系。《地基基础设计标准》(DGJ 08-11-2018)^[3]中提到:

考虑地基沉降速率的工程宜进行固结系数的测定, 对于厚度大的高压缩性软土, 还需测定次固结系数。因此, 研究次固结对沉降相当重要。

本文将通过次固结系数试验来对上海第④层淤泥质黏土的次固结特性进行探讨。试验土样取自上海市轨道交通市域线机场联络线工程, 该工程从虹桥枢纽出发, 经沪杭铁路外环线、七宝、华泾、三林、张江、迪士尼、浦东国际机场等重要地区, 最后到达上海东站, 采用高架、地面和地下结合的敷设方式, 东西向的快速通道。整条线路途经闵行区、徐汇区、浦东新区 3 个行政区, 绝大部分为滨海平原地貌, 地下水位通常在 1.0~1.5 m, 淤泥质黏土层遍布。共取 10 组土样试验, 为本文提供了大量翔实的数据。

1 土样和试验方法

1.1 土样的基本物理力学指标

上海第④层淤泥质黏土, 灰色, 沉积年代为 Q_4^1 , 层顶埋深约为 7~12 m, 常见厚度为 5~10 m, 属高灵敏度、高压缩性、抗剪强度低、承载力低的欠压密土, 是天然地基的主要软弱下卧层。这类具有明显流变性质的土的次固结沉降量较大, 因而不能忽视。本次试验中液限测定采用数显液塑限联合测定仪, 取下沉 10 mm 深度的含水量为液限, 塑限采用搓条法测定。

表 1 的指标为该层土的平均值。由表 1 可知, 该层土高含水率、高孔隙比、高液限、流塑, 且基本呈饱和状态。

1.2 固结试验方法

切取原状土试样环刀样, 取样深度为 10~21 m, 环刀内径为 61.8 mm, 高度为 20 mm。为了避免加荷

收稿日期: 2021-05-12

作者简介: 杭荟旻(1995—), 男, 本科, 辅助设计, 从事土工试验工作。

表 1 土的物理指标

密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 e	液限 $\omega_L/\%$
1.71	50.1	1.43	46.1
塑限 $\omega_p/\%$	液性指数 IL	饱和度	含水比
25.8	1.19	97	1.09

注:含水比为含水量与液限的比值。

大小、加荷时间和加荷率的不同对土体次固结系数 C_α 的影响,本次试验加荷率为 1,加荷时间为每级 24 h。为保证精度要求,所使用的固结仪事先校准,仪器采用全自动中压固结仪(GZQ-1),相对减少了人为误差,固结试验的加压等级为 50 kPa、100 kPa、

200 kPa、300 kPa、400 kPa。按标准固结进行试验,试验遵循现行国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[4]。试验数据见表 2。

2 试验结果分析

2.1 固结 $e-P$ 曲线特性分析

以 1 号土样各级压力下的孔隙比为纵坐标,压力为横坐标,作该土的压缩曲线(见图 1),其压缩特性曲线陡峻,压力增加时,可以看到土的孔隙比明显减小,20 mm 的试样沉降达到 3.904 mm,压缩系数 a_{v1-2} 为 0.871,压缩模量 E_{s1-2} 为 2.255,属于高压缩性土样。

表 2 原状土固结试验参数

序号	深度 /m	含水率/%	100 kPa 下		200 kPa 下		300 kPa 下		400 kPa 下	
			$C_\alpha(\times 10^{-2})$	C_c	$C_\alpha(\times 10^{-2})$	C_c	$C_\alpha(\times 10^{-2})$	C_c	$C_\alpha(\times 10^{-2})$	C_c
1	19.1	51.3	0.722	0.279	0.775	0.355	0.802	0.455	0.857	0.528
2	21.1	57.3	0.655	0.292	0.663	0.389	0.777	0.318	0.967	0.472
3	10.4	48.5	0.914	0.236	0.948	0.336	0.979	0.466	0.984	0.472
4	14.9	47.3	0.867	0.256	0.916	0.369	0.970	0.455	0.978	0.464
5	10.5	47.2	0.816	0.226	0.897	0.326	0.982	0.256	0.993	0.400
6	15.4	49.3	0.377	0.136	0.414	0.189	0.475	0.290	0.560	0.264
7	17.1	47.8	0.414	0.203	0.611	0.336	0.890	0.534	0.941	0.472
8	16.1	46.3	0.606	0.256	0.641	0.346	0.725	0.318	0.804	0.328
9	17.1	56.0	0.594	0.302	0.654	0.392	0.794	0.324	0.832	0.456
10	11.4	49.8	0.631	0.312	0.839	0.316	0.847	0.415	0.988	0.440

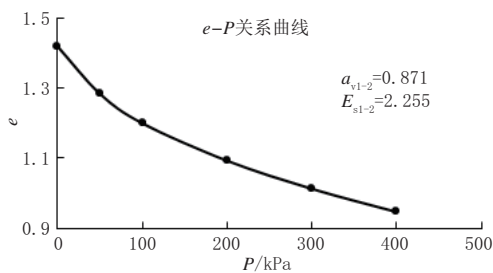


图 1 各级压力下的孔隙比曲线

2.2 主、次固结的划分

次固结曲线是在对应某一压力下,以孔隙比 e 为纵坐标,时间在对数横坐标上,绘制的 $e-lgt$ 曲线,而通过公式换算,也同样可以用变形量与时间对数关系曲线 $d-lgt$ 表示。图 2 为 1 号土各级压力下的次固结系数曲线,它所得到的变形量与时间对数关系 $d-lgt$ 曲线类似反 S 形。

图 2 中加载初始阶段变形量较大,持续一段时间后出现明显的拐点。拐点后变形量随时间缓慢减小,而且随着固结压力的增加,拐点出现的时间也相应的延长。变形量与时间对数曲线的后半部分可用两端直线来拟合。

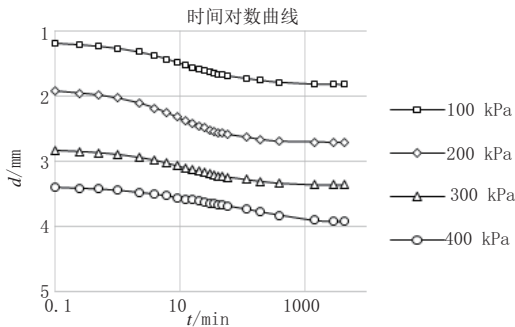


图 2 各级压力下的次固结系数曲线

图 3 为 1 号土 200 kPa 压力下的次固结系数曲线,从中可看出两直线交点处 t_1 为主固结完成时间、次固结开始的时间。其后一直线段的斜率为次固结系数 C_α 。它是表征饱和软黏土蠕变特性的一个重要指标。本次主固结一般持续 1~5 h,而次固结变形与对数时间几乎成直线关系。

2.3 各压力下次固结系数的特性

本次试验由表 2 可看出,随着压力的增加,次固结系数随之增加。图 2 曲线在各级压力下,次固结变形随时间的变化并不明显,24 h 内看不出次固结稳定的趋势。试验数据说明,在每级压力历经 24 h、室内

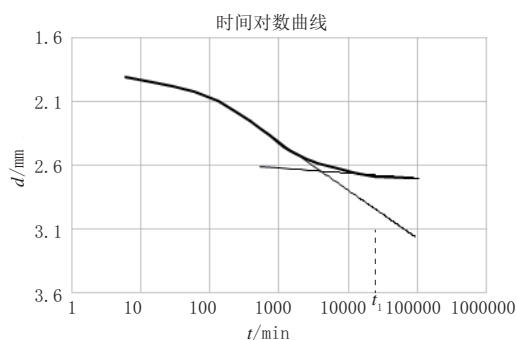


图3 200 kPa 压力下的次固结曲线

只有 20 mm 厚土样的条件下,次固结持续时间较短,都未能达到稳定。那现实情况 10 m 左右厚土层、荷载更大的情况下的次固结可能延续 1 a、2 a 甚至更久。从曲线图 2 可知,在原状土超过结构屈服应力 200 kPa 后,300 kPa、400 kPa 的次固结系数曲线渐渐趋缓。

Mesri^[5](1973)以 $C_a/(1+e)$ 的数值对土的次固结性进行了划分(见表 3)。

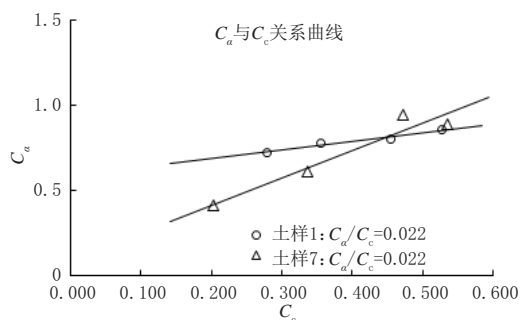
表3 按次固结性对土的分类

$C_a/(1+e)$	<0.002	0.004	0.008	0.016	0.032	>0.064
次固结性	很低	低	中等	高	很高	极高

通过计算,这层土的 $C_a/(1+e)$ 最小值为 0.162。依据表 3 划分原则,上海第④层淤泥质黏土的次固结性属于极高,在工程运用设计时,应充分考虑到这层软黏土的次固结。

2.4 与压缩指数的关系

压缩指数 C_c 越大,表明土的压缩性越高。通过表 2 计算后,画出次固结系数与压缩指数 C_c 的关系曲线(见图 4)。

图4 C_a 与 C_c 关系曲线

《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)^[6]的条文说明中提到:黏性土次固结系数 C_a 与相应压力下的压缩指数 C_c 之间存在线性关系。本次试验也证明,第④层淤泥质黏土次固结系数与相应压力下的压缩指数之间也存在线性关系。由表 2 数据可计算得出,通常情况下 C_a/C_c 比值在 0.017~0.028 范围内,试验结论与传统的经验值保持了一致,与 Mesri 和 Godlewski^[7]次固结系数与压缩指数之比为 0.025~0.1 的结论吻合,且接近其下限值。

3 结 语

本文通过对上海第④层淤泥质黏土次固结系数的试验,分析了本层土次固结的初步规律和特性。初步结论如下:

(1)第④层土为高压缩性土,次固结随压力的增加而增加,且随应力时间而趋缓。

(2)本文用试验数据计算得出第④层土的次固结系数与压缩指数之比基本为 0.02,呈良好的线性关系。

(3)第④层土的次固结性属于极高,对上海以及沿海的厚层的流塑状软黏土,处理困难,相关工程设计施工时尤其要注意其次固结变形的影响。

(4)关于上海市轨道交通机场联络线的地面敷设段,这种高速铁路由于车辆往复运动引起的循环加载而产生的次固结变形引起的沉降将造成地基不平整,进而会引起铁路轨道不平,损坏轨道结构,减少其服役寿命。因此,正确认识上海第④层淤泥质黏土的次固结变形对该地区的基础建设和运营维护意义重大。

参考文献:

- [1] 雷华阳,张文振,丁小冬,等.考虑软土结构强度的次固结特性试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(7):1221-1227.
- [2] 赵成刚,白冰,等.土力学原理(2版)[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [3] DGJ 08-11-2018,地基基础设计标准[S].
- [4] GB/T 50123-2019,土工试验方法标准[S].
- [5] E.W.BRAND, R.P.BRENNER.软黏土工程学[M].叶书麟,宰金璋,译.北京:中国铁道出版社,1991.
- [6] TB 10102-2010,铁路工程土工试验规程[S].
- [7] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and Stress-Compressibility Inter-relationship[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1977, 103(5): 417-430.