

深圳软土变形特性与工后沉降

Deformation behavior of Shenzhen soft clay and post-construction settlement

张惠明¹, 徐玉胜¹, 曾巧玲²

(1. 铁道部科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳 518034; 2. 北方交通大学, 北京 100044)

摘要: 根据软基处理工程实测资料研究深圳软土的固结变形特性, 给出了深圳粘土卸载后的次固结系数的计算式。结合一系列次固结试验提出了卸除超载后软基在永久荷载下的工后沉降的分析方法。结果表明, 对于深圳软土, 室内试验得到的固结系数和压缩指数与实测推算的相关指标是相近的。超载预压通过减小次固结系数和推迟次固结发生时间来减少一定时间内软基的次固结沉降。

关键词: 软土; 工后沉降; 现场试验; 压缩指数; 固结系数; 次固结变形

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0509-06

作者简介: 张惠明(1962-), 男, 广东人, 中南大学学士, 铁科院硕士, 渥太华大学博士, 铁科院深圳分院高级工程师, 主要从事岩土工程的设计和研究工作。

ZHANG Hui-ming¹, XU Yu-sheng¹, ZENG Qiao-ling²

(1. Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences, Shenzhen 518034, China; 2. North Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the field data measured from several projects of soft ground improvement in Shenzhen city, as well as the test data from a serial of tests of secondary compression on the soft clay, the behavior of consolidation and deformation of Shenzhen soft clay was studied and a method to estimate the post-construction settlement and the equation to estimate the coefficient of secondary compression after the removal of surcharge are proposed. It was found that its coefficient of consolidation and compression index obtained from lab are close to that calculated from the field data. Surcharge can reduce the secondary settlement of a soft foundation by decreasing the coefficient of secondary compression and by delaying the occurrence of secondary compression.

Key words: soft clay; post-construction settlement; field test; compression index; coefficient of consolidation; secondary compression

1 概 述^{*}

由于软土的高压缩性、低渗透性和低强度, 修建在软土地基上的建构筑物经常遇到沉降问题和稳定问题。软基的沉降问题主要是工后沉降问题, 即竣工后软基仍发生较大的沉降变形而对上部构筑物造成不同程度的损坏, 影响其正常使用。因此, 有必要对影响软基工后沉降的因素及工后沉降分析进行深入的研究。

软基的工后沉降比较复杂, 主要影响因素有软土的物理力学性质、土层条件、荷载条件、处理方法及工期等。土层条件, 如软土层的厚度和排水边界条件等, 可以通过地质勘察较准确地探明。荷载条件、软基处理方法和工期等也较容易确定。软土的物理力学性质指标一般通过室内试验取得。由于现场取样、运输和制备试样过程的扰动, 室内试验条件与现场条件的差异, 试验设备与试验技能的影响等, 室内试验得到的固结和变形指标往往与实际情况有较大的出入。通过对软基沉降过程的观测, 反推相关的固结变形指标, 可以了解室内试验结果的精确程度, 为软土地基的沉降和工后沉降的准确计算提供依据。

次固结系数是影响软基工后沉降的重要参数。对于软粘土次固结变形已有许多研究, 如压缩时间、应力水平、应力历史对次固结系数的影响等^[1~7]。通过这些

研究, 对次固结变形特性有了一定的了解。对于深圳软土而言, 如何估计其次固结变形, 通过何种手段可以减少次固结变形等, 都是值得研究和有实际工程意义的。

本文通过现场实测资料推算深圳软土的压缩指数和固结系数, 分析了相关室内试验参数的精度; 对深圳软土进行了一系列次固结试验, 结合试验结果和观测结果提出了深圳软土工后沉降的计算方法。

2 深圳软土性质及软基处理概况

2.1 深圳软土的物理力学指标

深圳软土主要是指深圳地区淤泥。该淤泥层属第四纪的海相沉积层, 广泛分布于深圳西部的沿海地区和伶仃洋东岸, 厚度一般 3~10 m, 呈流塑状, 黑灰色, 含有 5%~10% 的有机质。其工程特性是含水量高, 孔隙比大, 压缩性很高, 抗剪强度和渗透性都很低(见表 1)。

2.2 现场地基处理概况

机场试验段: 位于宝安区福永镇, 淤泥层厚 4~9 m, 采用插板排水固结堆载预压法处理, 插板间距 0.9~1.2 m。原地面上荷载约 120 kPa。

深圳湾填海区: 位于世界之窗等旅游区和滨海大

表 1 深圳软土的物理力学性质

Table 1 Physical properties of Shenzhen soft clay

取样地点	$w / \%$	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e	$a_{v(1-2)} / \text{MPa}$	C_c	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
深圳地区 ^[7]	57.9~99.4	14.8~16.7	1.51~3.34	1.01~3.40		4.0~8.0	2.0~7.0
机场试验段	94.9	14.8	2.569	2.18	0.757	5.0	0.0
机场站坪	82.1	15.4	2.226		0.583	6.2	2.3
福田开发区	77.7		2.045		0.603		
深圳湾填海区	80.0	15.5	2.170	1.57	0.520	5.3	2.6
蛇口某住宅区	84.6	14.7	2.390	1.65	0.450		
宝安固戍区	86.5	15.4	2.240	2.30	0.760	9.5	2.3

表 2 深圳软土实测推算压缩指数与固结系数

Table 2 Compression index and coefficient of consolidation of Shenzhen soft clay estimated from field data

观测地点		淤泥层厚 /m	插板间距 /m	加载 方法	实测最终沉降* /mm	C_c		$C_v / (10^{-4} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
						实测	室内	实测	室内
机场试验段	A 区	8.1	1.2	堆载	1376	0.76		4.3	
	B 区	4.8	0.9	堆载	1065	0.77		4.2	
	平均					0.77	0.76	4.3	4.1
蛇口某住宅区	D2	5.8	1.1	堆载	609	0.40		6.9	
	D3	5.5	1.1	堆载	559	0.35		5.9	
	D4	4.9	1.1	堆载	695	0.51		5.7	
	平均					0.42	0.46	6.2	5.8
宝安固戍区	S1	7.6	0.9	真空预压	1491	0.74		5.8	
	S2	8.1	0.9	真空预压	1399	0.68		6.1	
	S3	7.5	0.9	真空预压	1450	0.73		5.5	
	平均					0.71	0.76	5.8	
深圳湾填海区	T210	5.1	1.0	堆载	956	0.58		5.9	
	T211	5.0	1.0	堆载	912	0.55		6.2	
	平均					0.57	0.52	6.0	5.5

注: * 已减去淤泥层下卧土层的沉降量。

道之间,淤泥层厚 3~5 m,采用插板排水固结堆载预压法处理,插板间距 0.9~1.2 m。原地面上荷载 136 kPa。

蛇口某住宅区:位于深圳市南山区后海大道以东,红线内面积约 9 万 m^2 。淤泥层厚 3~9 m,采用插板排水固结堆载预压法处理,插板间距 1.1 m,原地面上荷载 103 kPa。

固戍区某市政路:位于宝安固戍开发区,道路宽 40 m,淤泥层厚 7~10 m。采用插板排水固结真空预压法处理,插板间距 0.9 m,砂垫层厚约 1.8 m,真空预压荷载 80 kPa。

3 用实测资料推算固结变形参数

3.1 沉降观测

上述软基处理工程的沉降观测项目主要有地面沉降、深层沉降和分层沉降。沉降板设置在原地面上,深层沉降标埋设在淤泥层底,分层沉降环埋设在淤泥层中。三种沉降设施均在排水插板施工后立即埋设。沉降板和深层沉降标的沉降之差即为整个淤泥层的沉降,分层沉降环则可测知两测环之间淤泥层的沉降。

3.2 推算方法

根据实测的沉降过程曲线和地基处理的工况条件可以推算软基的最终沉降(实际为瞬时沉降和主固结沉降之和,未包括次固结沉降)、淤泥层平均固结系数和压缩指数。最终沉降量采用指数法和 Asaoka 法推算。这两种推算方法均是以固结理论为依据发展而来,有相同的理论基础,当观测时间较长时,两种方法推算的结果是一致的。

固结系数的推算固结度计算的反过程:根据推算的最终沉降量计算某时刻的固结度,再结合淤泥层厚度、排水板布置形式和间距等参数反推得到;也可以根据实测沉降曲线用指数法推算相关系数,进而推算固结系数。反推过程中,需要知道淤泥水平方向和竖直方向固结系数的关系。参照室内试验结果,假定水平方向固结系数是竖直方向的 1.1 倍。

淤泥压缩指数由淤泥层的厚度和固结状态、淤泥层压缩量和有效荷载推算得到。测点处淤泥层厚度在钻孔埋设测头时确定。原状土样的试验结果表明,淤泥基本处于正常固结状态。几个工点的加载面积较

大,工况条件接近一维固结,剪切变形导致的沉降可以忽略,观测得到的沉降基本为固结沉降。有效荷载根据堆载量和地下水位确定。因此,根据工况条件和淤泥的固结状态计算淤泥层的沉降量,调整压缩指数,当计算的沉降量和实测推算的沉降量相等时,对应的压缩指数即为所求的淤泥压缩指数。

3.3 推算结果

根据实测沉降资料推算的深圳淤泥压缩指数和固结系数见表2。表中结果表明,对于同一工点,不同测点得到的压缩指数 C_c 比较接近:机场试验段为0.76~0.77;蛇口某住宅区为0.35~0.51,平均0.42;深圳湾填海区为0.55~0.58,平均0.57;宝安固戍区为0.68~0.74,平均0.71。机场试验段淤泥的固结系数较低,约 $4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$;其他工点的较接近,在 $(5.5 \sim 6.9) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 之间,平均约 $6.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

比较实测推算结果和室内试验结果可知,推算的淤泥固结系数比室内试验值稍大些,两者相差 $(0.2 \sim 0.5) \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$,误差在10%之内。而室内试验得到的淤泥压缩指数和推算值基本一致:对于机场试验段和深圳湾填海区,两者仅差0.01;蛇口某住宅区和宝安固戍区也只相差0.04~0.05。也就是说,对于这几个工点,软基固结沉降的理论计算结果和实际情况是相吻合的。

由于影响软土地基固结沉降的因素复杂,理论分析结果一般与实际情况有较大的差异。上述几个深圳工点的理论计算结果与实测结果比较接近,其原因有:①对场地的地质分层情况了解得比较清楚;②深圳软土层一般比较简单:厚度不大,成因相同沉积年代相近,同层软土比较均匀,且基本处于正常固结状态;③荷载条件比较简单,几个工点的加载面积较大,对于不到10 m的软土层,其工况条件接近一维固结状态,而常规的计算方法是基于一维理论推导而来;④室内试验得到的固结与变形参数基本反映了淤泥的固结变形特性。压缩试验通常要将试样压缩到较大的压力范围才能得到压缩指数。较大的压力可以减小或消除淤泥试样在取样运输和制备过程中受到的扰动,从而得到与实际情况吻合的压缩指数。

从以上分析可知,对于深圳软土,常规压缩试验得到的压缩指数和固结系数与软土原位指标是比较接近的,可以满足工程设计的精度要求。

4 次固结变形特性

粘土次固结变形是指在恒定的固结压力下,由于土骨架的粘滞蠕变作用而随时间不断发展的变形。次固结变形通常用次固结系数描述,其定义为单位时间

对数周期粘土孔隙比的变化量。

为了解深圳软土的次固结变形特性,取机场试验段、机场站坪区和福田开发区的软土作次固结试验:正常固结状态下的次固结试验和经超载预压后的次固结试验。两类试验各作22个,单个试验的测读时间长达70~100 d。试验结果分述如下。

4.1 次固结系数与时间的关系

在次固结变形阶段,通常认为粘土的变形与时间对数成线性关系,也就是说,次固结系数应为常数。但是对于深圳软土,其次固结系数不是常数,尤其是在进入次固结变形的初始阶段,其变化是较大的。表3所列出的是原状试样在不同时间对数周期的次固结系数。结果表明,对于试验堤软土,其次固结系数在时间对数周期 $10^3 \sim 10^4 \text{ min}$ 为0.0143~0.0190,而在 $10^4 \sim 10^5 \text{ min}$ 内仅为0.0012~0.0131,平均比前者减少了45%。对于站坪区软土,两个时间对数周期的平均次固结系数分别为0.0156和0.0138,后者比前者减少了12%。

表3 不同时间对数周期的次固结系数

Table 3 Coefficient of secondary compression within different periods

取样地点	试样编号	次固结系数 C_α		
		$\Delta t = 10^3 \sim 10^4 \text{ min}$	$\Delta t = 10^4 \sim 10^5 \text{ min}$	$\Delta t = 10^3 \sim 10^5 \text{ min}$
机场试验堤	4-3	0.0180	0.0112	0.0143
	6-4a	0.0152	0.0075	0.0118
	6-4b	0.0143	0.0120	0.0129
	2-7a	0.0190	0.0103	0.0126
	2-7b	0.0184	0.0115	0.0126
	2-11a	0.0171	0.0131	0.0147
	2-11b	0.0143	0.0091	0.0129
	平均	0.0166	0.0107	0.0131
福田开发区	BQ3-2	0.0166	0.0130	0.0146
	BQ3-8	0.0189	0.0150	0.0168
	BQ3-12	0.0176	0.0140	0.0157
	BQ6-2	0.0166	0.0180	0.0173
	BQ6-7	0.0118	0.0130	0.0125
	BQ6-12	0.0118	0.0100	0.0108
	平均	0.0156	0.0138	0.0146

因此,对于深圳软土,次固结试验必须要测读较长时间才能得到较精确的次固结系数。本文的次固结系数采用的是两个时间对数周期 $10^3 \sim 10^5 \text{ min}$ 的平均次固结系数。

4.2 应力水平对次固结系数的影响

进行了6组对比试验,研究不同固结压力下深圳软土的次固结系数:每组试验从一个原状土样切取两个压缩试样,分别施加100 kPa和200 kPa的固结压力进行次固结试验。

试验结果见表 4。结果表明,在其它条件相同的情况下,不同固结压力对应的次固结系数是相近的,两者的差值在 0.0000~0.0018 之间,平均相差只有 0.0004。这些结果和其它粘土的研究结果是一致的^[1,3,4]。因此可以认为,在正常的压力范围内,深圳软土的次固结系数与固结压力无关。

表 4 不同固结压力下的次固结系数

Table 4 Coefficient of secondary compression under different pressures

取样地点	土样编号	土样深度 / m	次固结系数	
			$p = 100 \text{ kPa}$	$p = 200 \text{ kPa}$
机场站坪	B- 1	1.0~ 1.3	0.0084	0.0081
	B- 2	1.5~ 1.8	0.0090	0.0086
	B- 3	2.5~ 2.8	0.0137	0.0137
机场试验堤	6- 4	2.2~ 2.5	0.0118	0.0129
	2- 7	3.7~ 4.0	0.0136	0.0126
	2- 11	5.7~ 6.0	0.0147	0.0129

4.3 应力历史对次固结系数的影响

虽然粘土的次固结变形是由于土骨架的粘滞蠕变作用而产生,但已有的研究表明,通过超载预压可以减少次固结系数,减少的程度与超固结比相关^[4~6]。

超载预压对深圳软土的次固结变形的影响是明显的。图 1 是深圳软土在不同固结比下的次固结系数。从图 1 可见,超固结比 $OCR = 2.0$ 时的平均次固结系数为 0.0042,明显小于正常固结时的平均值 0.0128。即通过超载一倍的预压后,次固结变形减少了 67%。重塑土的预压效果更为显著, $OCR = 1.0$ 时的次固结系数高达 0.0301, $OCR = 1.5$ 时已减至 0.0002。因此,深圳软土的次固结变形是可以通过超载预压来减少或消除的。

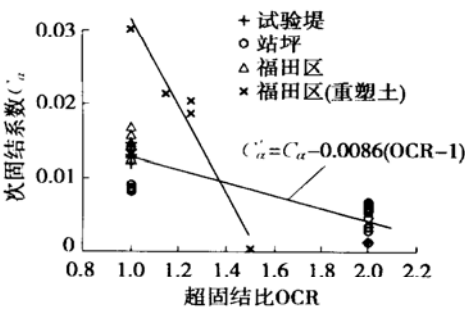


图 1 超载对深圳软土次固结变形的影响

Fig. 1 Effect of surcharging on secondary settlement of Shenzhen soft clay

超载预压可以推迟次固结变形的发生。图 2 是典型的超载预压条件下的变形—时间对数曲线。图中试样的初始孔隙比 2.029,逐级加载到 200 kPa 后 150 min (固结度达 95%) 卸载至 100 kPa。卸载后试样孔隙比由 1.383 快速回弹至 1.392,1440 min 时达峰值 1.394 并维持至 10000 min 以上,随后才发生次固结变形。次固结变形延后的时间一般是主固结时间的几十倍。因此,超

载预压除了可以减少软土的次固结系数外,还推延了次固结变形的发生。其它粘土也表现出相同的性质^[8]。这种特性将大大减小软基在一定时间内的次固结变形。

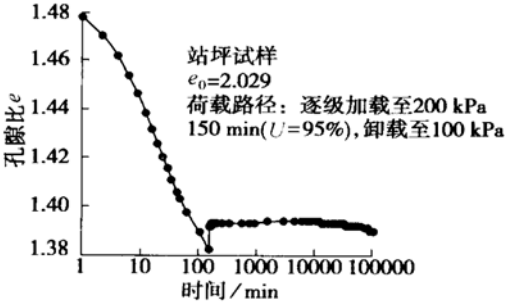


图 2 深圳软土典型超载预压时间变形曲线

Fig. 2 Typical behavior of Shenzhen soft clay after precompression under surcharge

4.4 次固结系数与压缩指数的关系

Mesri 等^[9]总结了 22 种粘土的次固结试验结果后发现,对于同一种原状土,次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 是一个常数。

表 5 深圳软土次固结系数与压缩指数的关系

Table 5 Relation between compression index and coefficient of secondary compression for Shenzhen soft clay

取土地点	试验编号	e	C_c	C_a	C_a/C_c
站坪	B- 1a	1.598	0.583	0.0084	0.014
	B- 3a	1.901	0.408	0.0090	0.022
	B- 4a	1.821	0.583	0.0137	0.023
	B- 1b	1.617	0.583	0.0081	0.014
	B- 3b	1.922	0.408	0.0086	0.021
	B- 4b	1.819	0.583	0.0137	0.023
	平均			0.0101	0.022
试验堤	4- 3a	2.676	0.847	0.0143	0.017
	6- 4a	2.336	0.703	0.0118	0.017
	2- 7a	2.600	0.926	0.0136	0.015
	2- 11a	1.807	0.701	0.0147	0.021
	6- 4b	2.371	0.703	0.0129	0.018
	2- 7b	2.649	0.928	0.0126	0.014
	2- 11b	1.829	0.701	0.0129	0.018
	平均			0.0130	0.017
福田区	BQ3- 2	2.231	0.589	0.0146	0.025
	BQ3- 8	2.583	0.681	0.0168	0.025
	BQ3- 12	1.587	0.548	0.0157	0.028
	BQ6- 7	1.861	0.555	0.0125	0.023
	BQ6- 12	1.615	0.548	0.0157	0.029
	平均			0.0151	0.026

从表 5 的试验结果看,深圳地区软土的次固结系数 C_a 与压缩指数 C_c 之间的关系与 Mesri 等的结论是相符的。对于站坪土样, $C_a/C_c = 0.014 \sim 0.023$, 平均 0.022; 试验堤土样的 C_a/C_c 略小, 为 0.014~0.021, 平均 0.017; 福田区土样的 C_a/C_c 则略大, 为 0.023~

0.029, 平均 0.026; 三个地点取得土样的比值 C_α/C_c 相差不大, 所有试样 C_α/C_c 的平均值为 0.022。因此, 在没有次固结试验结果的情况下, 深圳地区软土的次固结系数可以利用上述结果进行估算。

4.5 实测推算的次固结系数

机场试验堤 B 观测断面的地面沉降观测近 800 d。典型的沉降曲线见图 3。根据 B 区的砂井间距、软土层厚度和实测推算的固结系数计算得到, 400 d 的软基平均固结度已有 99.9%, 此后进入了平缓的次固结沉降阶段。用该观测断面三块沉降板 400 d 后的沉降资料推算得到的次固结系数分别为 0.0166, 0.0206 和 0.0232, 平均为 0.0201。这些结果和试验堤土样在时间周期 $10^3 \sim 10^4$ min 的次固结系数是吻合的。

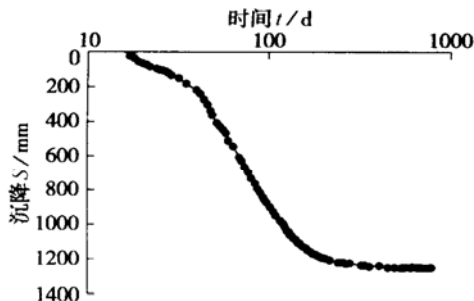


图3 机场试验堤 B 区典型时间沉降曲线

Fig. 3 Typical time-settlement curve of the test embankment

5 工后沉降分析

软基的工后沉降等于软土层未完成的主固结沉降与次固结沉降之和:

$$S_r = (S_c - S_t) + S_a \quad (1)$$

式中 S_c 为永久荷载下软基的主固结沉降, S_t 为超载下软基已发生的沉降, S_a 为次固结变形, 当 S_t 大于 S_c 时, $(S_c - S_t)$ 为零。

主固结沉降和正常固结下的次固结沉降已有较成熟的计算方法, 下面主要讨论超载预压后的次固结沉降计算。超载预压后软基的次固结变形可用下式计算:

$$S_a = C'_\alpha \frac{H_0}{1+e_0} \log \frac{t}{t_1} \quad (2)$$

式中 C'_α 为预压后的次固结系数, H_0 为软土层厚, e_0 为初始孔隙比, t_1 为卸载至次固结变形开始出现之间的时间, t 为从卸载起算的构筑物使用时间。

由上式可知, 预压后次固结变形计算关键是要确定超载预压后软土的次固结系数, 以及卸除超载后多长时间软土层次固结变形才发生。

5.1 次固结变形延后时间 t_1 的确定

施加荷载时, 软土中产生超静孔隙压力, 孔隙水外排并产生固结变形。由于软土的渗透性差, 孔隙水外

排的压缩固结过程需要较长的时间才能完成。相反, 卸除超载时, 由于土骨架的回弹作用, 软土中产生负孔隙水压力, 外界水份要不断渗进软土孔隙, 直至达到新的水力平衡。同样道理, 水份内渗的回弹过程也需要较长时间才能完成。

卸载后土样的回弹可分为主回弹阶段和次回弹阶段, 此后才再现次固结压缩变形。主回弹阶段的时间较短, 但次回弹则需很长时间才能完成, 次回弹时间 t_s 往往是主回弹时间 t_{pr} 的几十倍(如图 2), 而超载预压导致的次固结延后时间 t_1 为两者之和。

主回弹时间 t_{pr} 可以用压缩固结理论计算, 但固结系数 C_v 用回弹系数 C_{vs} 代替^[10]。回弹系数 $C_{vs} = k_v / (Y_w m_{vs})$, k_v 和 Y_w 分别为软土的渗透系数和水容重, m_{vs} 为体积回弹系数。

次固结延后时间 t_1 可以通过下式估算^[9]:

$$t_1 = 100 R_S'^{1.7} t_{pr} \quad (3)$$

式中 超载比 $R_S' = (\sigma_{vc}' / \sigma_{vf}')$, σ_{vc}' 是超载作用下的最大有效压力, σ_{vf}' 是最终有效压力, t_{pr} 为主回弹时间。

5.2 次固结系数的确定

Mesri 等^[11] 长时间跟踪研究超载对软土次固结变形特性的影响, 发现卸载后次固结系数随时间而变化, 建议根据超载比、次固结回弹时间和所求次固结沉降的时间估算次固结系数, 并给出用于非有机质软土的估算图。但这种方法的可操作性差, 一是需要大量长时间的次固结试验才能得到该估算图, 二是该图不具备普遍性。如对于超载比为 1, 所求次固结沉降时间与次固结回弹时间之比为 10 的软土, 查该图可得卸载后的次固结系数与正常固结的次固结系数之比为 0.016。而根据次固结试验结果, 在相同的超载比和时间比的条件下, 对应的次固结比试验堤试样为 0.10, 站坪试样则高达 0.46, 均明显高于查图估算值。因此, 该方法不适用于深圳软土。

根据试验结果, 从实用的角度出发, 建议采用下式估算卸除超载后软土的次固结系数:

$$C'_\alpha = C_\alpha - \beta(OCR - 1) \quad (4)$$

式中 $OCR = (\sigma_{vc}' / \sigma_{vf}')$ 为超固结比; β 为超载折减系数, 根据试验结果确定, 见图 1。参照试验结果, 对深圳软土有 $C_\alpha = 0.022 C_c$, $\beta = 0.0086$ 。对于室内试验, C'_α 约为卸载后时间周期 $10^4 \sim 10^5$ min 的次固结系数。当 OCR 较小时, 式(4)估算的次固结系数稍稍偏大, 但非常简单便于应用, 精度也可满足一般工程要求。

5.3 算例

下面以宝安固戍区工点测点 S2 为例计算软基在处理 30 a 的工后沉降。据实测沉降曲线推算, 真空

预压下软土层的固结沉降 $S_{CS} = 1399 \text{ mm}$ 。已完成沉降 $S_t = 1323 \text{ mm}$, 固结度 $U = 95\%$ 。超载下淤泥层的平均压力 $p_s = 133.2 \text{ kPa}$, 平均永久荷载 $p_p = 78.2 \text{ kPa}$, 超固结比 $OCR = 1.62$ 。据试验结果, 体积压缩系数与回弹系数之比 $\frac{m_v}{m_{vs}} = 11.5$; 固结系数 $C_v = 5.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, 回弹固结系数 $C_{vs} = C_v \frac{m_v}{m_{vs}} = 66.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。据固结理论计算得到主回弹时间 $t_{pr} = 33 \text{ d}$, 据式(3)得到回弹时间 $t_1 = 1464 \text{ d}$ 。压缩指数 $C_c = 0.71$, 卸载后次固结系数 $C'_a = 0.0103$ 。由式(2)算得次固结沉降 $S_a = 23 \text{ mm}$ 。估算永久荷载下软基的主固结沉降为 979 mm , 由式(1)算得所求的工后沉降为 23 mm 。

6 结 论

(1) 深圳软土在常规压缩试验得到的压缩指数和固结系数接近其原位指标, 可以满足工程设计的精度要求。

(2) 深圳软土的次固结系数不是常数, 而是随对数时间周期的增加而减少。

(3) 初步结果表明, 室内试验得到的次固结系数与实测推算结果是吻合的。

(4) 深圳软土的次固结系数基本不受固结压力水平影响。

(5) 超载预压可减小次固结系数。对于深圳软土, 卸载后的次固结系数可用下式估算: $C'_a = 0.022C_c - 0.0086(OCR - 1)$ 。

(6) 超载预压可推迟次固结发生时间, 从而减少一

定时间内软基的次固结沉降。

参考文献:

- [1] Newland P L, Allely B H. A study of the consolidation characteristics of a clay[J]. Geotechnique, 1960, 10(2): 62-74.
- [2] Aboshi H. An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay including the secondary creep settlement[A]. Proc 8th ICSMFE: Vol 4[C]. 1973.
- [3] Horn H M, Lambe T W. Settlement of building on the MIT Campus[J]. J Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1964, 90(5): 181-195.
- [4] 刘世明. 软粘土次固结变形特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1988.
- [5] Wahls H E. Analysis of primary and secondary consolidation[J]. J Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1962, 88(6): 207-231.
- [6] Johnson S J. Precompression for improved foundation soils[J]. J Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1970, 96(1): 111-144.
- [7] SJG 04-96, 深圳地区地基处理技术规范[S] (深圳市标准).
- [8] Mesri G, Feng T W. Surcharging to reduce secondary settlement [A]. Proc Int Conf On Geotech Eng for Coastal Development Theory and Practice: Vol 1[C]. Yokohama, 1991. 359-364.
- [9] Mesri G, Godlewski P M. Time and stress compressibility interrelationship[J]. J Geotechnical Engineering Div, ASCE, 1977, 103(5): 417-430.
- [10] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [11] Mesri G, Feng T W, Lo D O K. Surcharging of soft ground to reduce secondary settlement [A]. Soft Soil Engineering [M]. Balkema, 2001. 55-65.

欢迎订阅《水利发展研究》(月刊)

《水利发展研究》是由水利部主管, 水利部水利发展研究中心主办的综合性学术刊物。《水利发展研究》的定位是水利系统软科学研究领域的综合性学术刊物, 综合报道国家的水利发展战略、水利政策、法制建设、水利经济、水利管理、水利信息和工程建设等方面的方针政策、理论、技术和经验, 为我国水利事业的可持续发展提供服务和支撑, 紧紧围绕水利部的中心工作和重点, 对我国水利发展具有普遍性、关键性的重大问题, 开展理论与实践上的探讨, 同时依托水利部发展研究中心的信息优势, 适当介绍国外的先进理论和经验。

《水利发展研究》主要面向从事与水利事业相关工作的机关领导、科研人员、企事业单位的管理者、大专院校师生以及广

大的基层水利工作者。《水利发展研究》2001 年入选中华人民共和国新闻出版总署“中国期刊方阵”(双效期刊)。

《水利发展研究》为国内外公开发行人, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 每期定价 6 元, 全年 12 期共计 72 元。凡需订阅者请到各地邮电局(所)订阅, 也可直接与本刊联系。欢迎踊跃投稿、订阅, 并提出宝贵意见。

刊号: ISSN1671-1408 代号: 国内邮发 2-784
CN11-4655/TV 国外 6441M

地址: 北京德外六铺炕水利部发展研究中心, 电话: (010) 82071270, 82076521, 传真: (010) 82076502, 邮编: 100011, E-mail: wrdr@waterinfo.com.cn, 联系人: 刘晓勤。