

上海软土的静止侧压力系数 K_0 的分布和变化规律的研究

魏道堦 杨熙章

(同济大学)

VARIATION OF K_0 -VALUES OF SHANGHAI SOFT SOILS

Wei Daoduo, Yang Xizhang (Tongji University, Shanghai)

ABSTRACT

This paper describes the laboratory test for K_0 -coefficient of Shanghai soils, comprising K_0 -values under different conditions of loading, drainage etc., in which the autographic K_0 -meter, developed by the authors and described in an earlier paper, is employed. The paper also presents the analysis of their variation and distribution pattern. Through these tests and analyses the authors obtained the distribution patterns for K_0 -values of typical soft layers of Shanghai region and the relation between K_0 and stress history, and made a preliminary and meaningful study on the relation between K_0 and consolidation of the soil sample.

提 要

本文应用在此之前所研制的 K_0 系数自动测试仪对上海软土进行各项不同试验条件下的 K_0 系数室内测定以及对它的分布与变化规律作了分析。经过试验研究,我们获得上海软土各典型土层 K_0 系数的分布图式以及 K_0 系数与应力历史的经验关系,并对它与土样排水固结的关系作了初步而有益的探讨。

一、前 言

土的静止侧压力系数 K_0 通常是指单元土体在无侧向变形条件下,侧向压力与竖向压力的比值。以有效主应力表示时即为

$$K_0 = \frac{\sigma_3'}{\sigma_1'} \quad (1)$$

土的 K_0 系数同地基土的变形、强度和稳定等问题的分析密切相关。作为土工设计中的一个基本参数,它的测定与取值一直是土工测试的重要内容之一。

在国外,各种土类的 K_0 系数试验仪器及其测定值不断地有所报导和介绍;我国不少单位和专家早在五十年代就对 K_0 系数作过研究^[1,2,3]。在他们工作的启示下,我们在六十年代初

参加本文的试验与资料整理工作的还有徐仁龙、李乃菊、傅荣根等同志。

期也曾对上海软粘土的 K_0 系数作过粗浅的试验研究,得到一些初步成果^[4]。现在我们应用已研制成的 K_0 系数自动测试仪^[5]在上海地区进行了自地面到20米左右深度范围内各土层的 K_0 系数的测定与研究,其中包括在不同试验条件下的 K_0 系数测定取值以及它与应力历史、孔隙压力消散、固结历时等关系的试验分析。本文将介绍这些研究工作的结果。

二、上海软土层的基本剖面与特性

上海地区的软土具有其地区本身的特点,这在文献^[6]中有过较详细的分层介绍。但我们为了便于对上海软土特性作系统研究,曾将上海地区浅层地基土归纳为基本的几个层次和作过简要介绍^[7],这里我们仍将沿用这样一种剖面。但限于取土地点的不同又与文献^[7]之综述略有出入。根据取土地点的分布,我们选取了上海市区、东北郊、西郊与南部等几个典型剖面,进行了各层土的 K_0 系数测定。一般说来所涉及的土层剖面上,均有下列的层次与基本特征:

表层(硬壳层)为褐黄色亚粘土,中密、可塑,厚度约2.5~3米。

第二层为灰色淤泥质亚粘土间或有轻亚粘土互层,或夹薄层粉砂。饱和、软塑,厚度6~10米。

第三层为灰色淤泥质粘土或夹有薄层粉砂。这层是上海软土的代表性土层。饱和、软塑至流塑状态,有明显的层理构造,俗称“千层饼”,厚度10~20米,一般厚度12米左右。

上海局部地区地面以下25~30米左右常埋藏有超固结的暗绿色或灰色粘土层^[7],但本文对此层土的试验是少量的。在暗绿色硬土层缺失的局部地区,淤泥质粘土层以下常是灰黄色轻亚粘土夹青灰色粉砂,厚度不规则,有时它又与亚粘土或粘土相间存在^[4]。

三、试验仪器装置

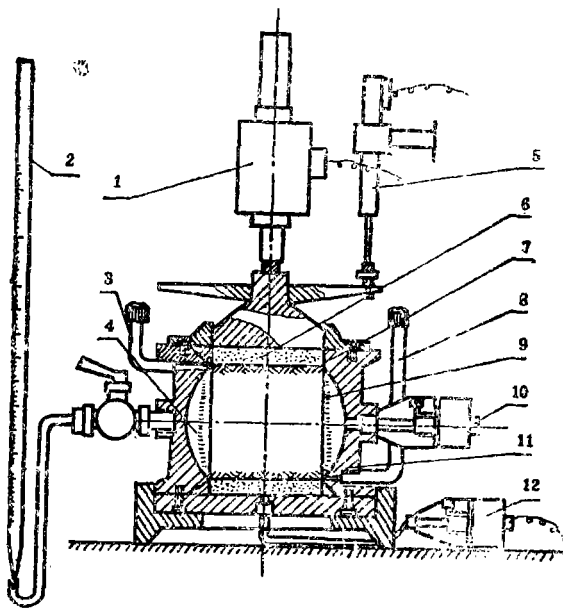
室内测定 K_0 系数的仪器和方法迄今为止已发展了许多种类和型式,总的说来,从土样压力室的构造上看,大体上(当然不是全部)可以划分为主要的两种基本型式:即刚性壁型和柔性壁型。后者包括了在三轴仪中进行的 K_0 系数测定方法。我们所研制的 K_0 系数自动测试仪是将原有的 K_0 仪^[4]的结构作了进一步改进使之底部可测孔隙压力,同时又设计选配了自动读取系统,成为一种能够自动测定 K_0 系数的试验装置,它是属于柔性壁类型(图1)。

四、试验方法

已有的试验研究表明:土的侧向压力以及 K_0 系数不是一个常量。它与土的物理性质如密度、含水量以及排水条件、应力历史和加荷方式等因素都有关系。我们根据现有的试验设备所能提供的试验条件,对上海软土进行了如下几项不同试验条件的 K_0 系数测定和分析。

- (1)连续快速加荷,模拟瞬间加荷或“不排水”条件,测定 $K_{0\epsilon}$ 值;
- (2)土样双面排水,测定排水条件下的 $K_{0\epsilon}$ 值;
- (3)连续加卸荷,土样双面排水,了解 $K_{0\epsilon}$ 系数与应力历史的关系;

• K_0 系数自动测试仪于1983年9月通过技术鉴定。



- | | |
|-------------|------------|
| 1. 拉压力传感器, | 2. 量 管, |
| 3. 排气管, | 4. 液体水, |
| 5. 位移传感器, | 6. 透水石, |
| 7. 金属密封环, | 8. 进水管, |
| 9. 乳胶薄膜, | 10. 液压传感器, |
| 11. 土样密封容器, | 12. 液压传感器 |

图 1 K_0 仪 (土样压力室) 简图

(4) 土样单面排水, 监测土样底部孔隙水压力 u_b , 求出有效应力条件下的 K'_0 值;

(5) 快速施加反复荷载, 测定 K_{0d} 值。这是以静代动了解动态 K_0 系数的变化。快速反复荷载即加卸荷频率均等于 1 赫兹。

五、成 果 分 析

1. 上海软土层 K_0 系数的分布规律

根据试验测定的各个土层的 K_0 系数, 按土层分布 (或深度) 予以整理、归纳, 绘制出 K_0 系数沿深度变化的分布图 (图 2 ~ 5)。各图上所有的 K_0 系数均取为该对应深度土样 K_0 系数的平均值。其中除图 5 是通过监测土样底部孔隙水压力计算得出的有效 K'_0 值外, 其余均为双面排水条件下的 K_{0c} 值。从各图可见, 上海地区不同剖面上各典型土层的 K_0 系数的分布形态有一定类似之处。粗略地说, 随着深度的变化, 不同土层的过渡, 在第二层淤质亚粘土或轻亚粘土层中, K_{0c} 值均较其相邻的上下二层略小, 故分布线左凸; 而在第三层的淤泥质粘土 (夹砂或不夹砂) K_{0c} 值均略增大, 分布线右凸。但它们在具体的数值大小上还是有差别的。如果粗略地对每一个剖面上的亚粘土和粘土层框取 K_{0c} 的平均数值时, 将有如图 2、3、5 中的平均值线所示。它们分别约为 0.480 ~ 0.520 (亚粘土) 和 0.570 ~ 0.620 (粘土); 就上海软土地基整个剖面而言, K_{0c} 平均约在 0.525 ~ 0.560 之间。

图 5 (a) ~ (c) 是上海南郊某工程的土层剖面上的 K_{0c} 、 K_{0s} 和 K_{0d} 测定值沿深度的分布。由图可见, 三种不同条件下的 K_0 系数都颇有规律。它们相互间的比值沿深度的分布变化也比较接近, 例如在一段深度范围内其比值的平均值可取作某一定值。这就为人们进一步研究并使之关系稳定提供了参考, 也就有可能为上海地区性土的侧压力系数进行经验性取值。尤为值得指出的是模拟动力条件下的 K_{0d} 值, 我们的工作只是以静代动的尝试, 但它与瞬间加荷条件下的 K_{0s} 的比值 r_{sd} 却都接近 0.8, 而且对于上海淤泥质粘性土又几乎为稳定值。这就是

说，如果理论上认为饱和软土瞬间加荷时 $K_{oc}=1.0$ ，则循环荷载作用下的 K_{oc} 将为0.8左右。

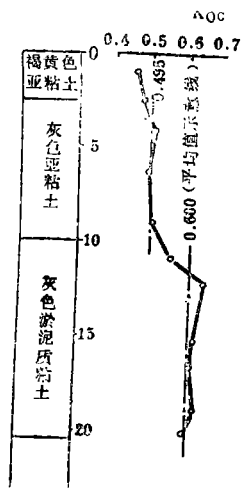


图2 市区某厂区土层剖面及 K_{oc} 的分布

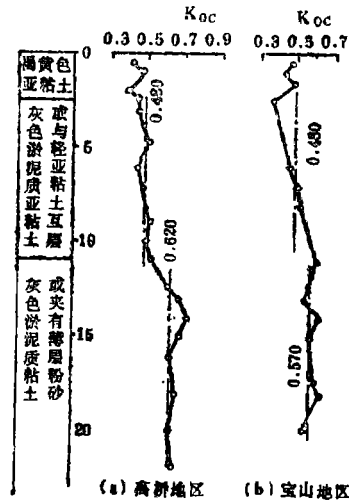


图3 东北郊地区典型土层剖面及 K_{oc} 分布

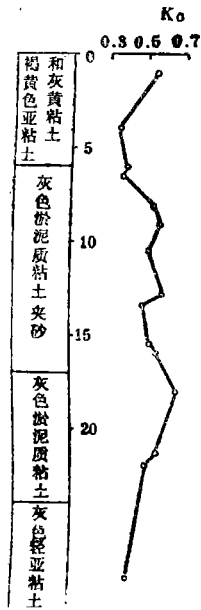


图4 西郊天山地区典型土层剖面及 K_o 分布

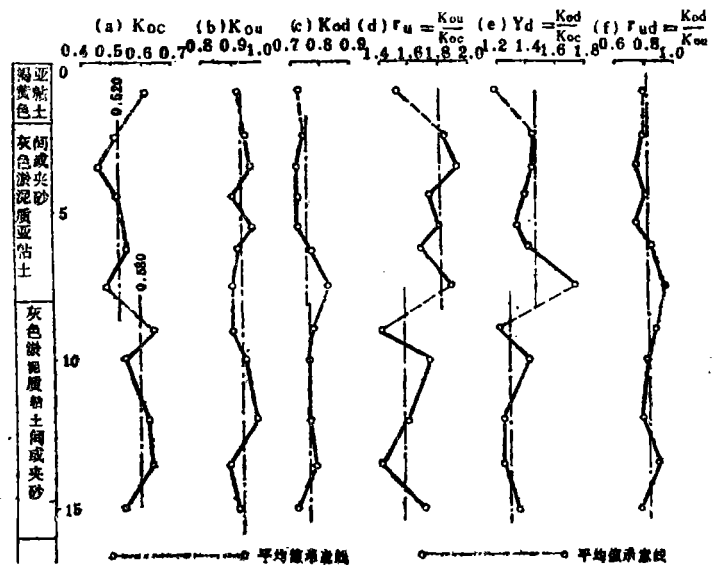


图5 南郊龙华地区典型土层剖面 K_{oc} 、 K_{ou} 、 K_{od} 及其相应比值 r_u 、 r_d 、 r_{ud} 的分布（土样饱和度85.5~100%）

2. 应力历史对 K_o 系数的影响

室内进行应力历史对 K_o 系数影响的研究，通常采用一次或多次加卸荷试验的方法。由于应力历史的影响， K_o 将不是一个恒定的常数。建立其间量的关系时，常用超固结比 R_{oc} 作为自变量研究 $K_o \sim R_{oc}$ 关系。一般看法是二者存在着下式关系：

$$K_o = K_{on}(R_{oc})^m \tag{2}$$

式中， K_{on} ——正常固结时的 K_o 系数；

m ——指数幂, 一般认为 $m \leq 0.41$ 。

不过, 近年的有些研究也已指出, 由于土类不同, 在卸荷支上求得的 $K_o \sim R_{oc}$ 关系不完全是指数关系^[8]。就上海土层而言, 即使同一粘性土层, 是否夹薄层粉砂对这一关系也有影响。大凡无夹砂的粘性土, $K_o \sim R_{oc}$ 呈半对数或直线关系(表1), 夹砂粘性土和轻亚粘土以及细砂、粉砂等 $K_o \sim R_{oc}$ 均呈指数函数关系, 而且 $m=0.52 \sim 0.57$, 还是比较稳定的一个数值(表1)

3. K_o 系数与孔隙水压力消散的关系

表1 上海地区各土层 $K_o \sim R_{oc}$ 的经验关系

土 名	$K_o \sim R_{oc}$ 关系(卸荷支)	统计特征值				
		r	$\hat{\sigma}_x$	$\hat{\sigma}_y$	Q	$R_m(\%)$
褐黄色粘性土	$K_o = 0.541 + 0.685 \log(R_{oc})$	0.997	0.301	0.017	0.002	4.39
灰色淤泥质粘土	$K_o = 0.523 + 0.094 R_{oc}$	0.985	6.620	0.112	0.403	7.48
暗绿色粘土	$K_o = 0.447 + 0.377 \log(R_{oc})$	0.977	1.044	0.040	0.019	9.85
灰色淤泥质粘土夹粉砂	$K_o = 0.445(R_{oc})^{0.565}$	说明: 表中有关统计参数符号意义见表5中说明。				
轻亚粘土	$K_o = 0.335(R_{oc})^{0.517}$					
细 砂	$K_o = 0.330(R_{oc})^{0.565}$					
粉 砂	$K_o = 0.336(R_{oc})^{0.570}$					

对于饱和土这个问题是研究 K_o 系数与土样固结的关系。由于所使用的侧压仪的结构如同“柔性环刀”的固结仪, 但仍能保持径向应变为零的“静止”条件, 因此可以引用太沙基一维固结理论的有关原理。

设 u_m 为土样中的平均孔隙水压力, u_m 为平均固结度, K'_o 为有效应力条件下的 K_o 系数以及取平均孔隙压力比 $R_{um} = \frac{u_m}{\sigma_1}$ 。则能写出如下各个关系式

$$K'_o = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = \frac{\sigma_3 - u_m}{\sigma_1 - u_m} = \frac{K_{o(s)} - R_{um}}{1 - R_{um}} \quad (3)$$

$$R_{um} = \frac{u_m}{\sigma_1} = 1 - U_m \quad (4)$$

以及
$$K'_o = \frac{K_{o(s)} - (1 - U_m)}{U_m} \quad (5)$$

式中, $K_{o(s)}$ ——随孔隙压力变化的总应力 K_o 系数;

σ'_1 、 σ'_3 ——分别为有效大小主应力。

在等应变控制连续加荷以及监测土样底部孔隙压力 u_b 的情况下, 根据太沙基固结理论和文献^[9]的假定, 可导得如下关系式:

$$K'_o = \frac{K_{o(s)} - \alpha R_{ub}}{1 - \alpha R_{ub}} \quad (6)$$

$$K_{0(\cdot)} = K'_0 + \alpha R_{u\cdot} (1 - K'_0) \quad (7)$$

$$K_{0(\cdot)} = K'_0 + (1 - K'_0)(1 - U_m) \quad (8)$$

上列式中, $R_{u\cdot}$ 为土样底部孔隙压力比

$$R_{u\cdot} = \frac{u_b}{\sigma_1} \quad (9)$$

$$\text{而} \quad \alpha = \frac{u_m}{u_b} = \frac{R_{u\cdot m}}{R_{u\cdot}} \quad (10)$$

根据文献^[9,10]的建议, 我们取 $\alpha=0.7$ 。上列各式中, 其余符号意义同前。

上列关系式(3、5、6~8)便是根据实测的 U_b 或 $R_{u\cdot}$ 以及换算的 U_m 求取 K'_0 和 $K_{0(\cdot)}$ 等的关系式, 也是据以观察总应力下 $K_{0(\cdot)}$ 随孔隙压力或固结度变化规律的关系式。不难看出, 直接用上列各式计算 K'_0 甚感不便, 因为式中包含有随 U_b 或 U_m 变化的 $K_{0(\cdot)}$; 或者又由于 K'_0 来确定而使观察判断 $K_{0(\cdot)}$ 的变化发生困难。再者, 在试验中应如何控制 U_b 或 $R_{u\cdot}$ 的大小使之试验结果比较稳定?

关于比值 $R_{u\cdot}$, 国内外已有的研究表明^[10]: 在控制 $R_{u\cdot} \leq 0.35$ 或更大的条件下, 加荷速率可以尽量增大, 而不致影响试验结果。不过这一论断是对于压缩试验的结果而言。对于 K_0 系数试验又将如何却未获得参考意见。为此, 我们从具体的试验数据入手进行统计分析, 分别建立 $K_{0(\cdot)} \sim R_{u\cdot}$ 和 $K_{0(\cdot)} \sim U_m$ 之间的经验关系。同时找出 $K_{0(\cdot)}$ 的平均值及其置信区间。在作置信区间判断时, 小子样选用 t 分布, 大子样用正态分布, 保证率统一取95%。然后再找出与置信区间对应的 $R_{u\cdot}$ 或 U_m 的合适的控制范围。由上述方法处理后获得的有效 K'_0 值便可认为是在一定的置信率保证下取得的可靠而稳定的 K'_0 系数。由此建立的 $K_{0(\cdot)}$ 与 $R_{u\cdot}$ 以及 $K_{0(\cdot)}$ 与 U_m 关系(公式11、12)可供实用参考。

关于上海地区软土(综合各粘性土层, 但主要是构造上海软土地基的主体软土层淤泥质粘土)的 $K_{0(\cdot)}$ 与 $R_{u\cdot}$ 以及 $K_{0(\cdot)}$ 与 U_m 的关系, 其平均值的置信区间以及与此相应的 $R_{u\cdot}$ 和 U_m 的控制范围, 均分别列于表2~5和图7、8中。表5还给出与经验公式有关的统计参数, 以便对公式的质量和实用性进行评价以及提供实用时参考。(注意: 为方便书写, 在表2~5中, 总应力下的 K_0 系数符号 $K_{0(\cdot)}$ 就写成 K_0 了)。

上列图表中的结果表明, 监测土样底部孔隙压力, 控制 $R_{u\cdot}$ 在0.15~0.25之间或者其平均值 $\bar{R}_{u\cdot} \approx 0.20$ 左右以及相应地使土样达到平均固结度 U_m 在0.80~0.90之间或者 U_m 的平均值 $\bar{U}_m \approx 0.85$ 左右, 将能使测定和计算的 $K_{0(\cdot)}$ 和 K'_0 值满足要求和可置信的。由这样的控制方法试验结果换算得到的 K'_0 值是比较稳定的数值。对于上海软土其 K'_0 约等于0.560(表4, 或者也可在0.540~0.570这一不大的范围内取值)。由此便将获得下列总应力下的 $K_{0(\cdot)}$ 的经验公式:

$$K_{0(\cdot)} = 0.560 + 0.308 R_{u\cdot} \quad (11)$$

$$K_{0(\cdot)} = 1 - 0.440 U_m \quad (12)$$

表2 上海软土的 $K_o \sim R_{ub}$ 关系以及与 K_o 置信区间

相应的 R_{ub} 控制范围

$K_o \sim R_{ub}$ 关系式	平均值 \bar{K}_o	K_o 的置信区间	相应 R_{ub} 的控制范围 平均值
$K_o = 0.540 + 0.398 R_{ub}$	0.623	[0.597, 0.649]	$\frac{0.14 \sim 0.26}{0.209}$

表3 上海软土的 $K_o \sim U_m$ 关系以及与 K_o 置信区间

相应的 U_m 控制范围

$K_o \sim U_m$ 关系式	平均值 \bar{K}_o	K_o 的置信区间	相应 U_m 的控制范围 平均值
$K_o = 1.011 - 0.455 U_m$	0.626	[0.605, 0.647]	$\frac{0.79 \sim 0.89}{0.845}$

表4 上海软土的有效 K' 值的计算结果

根据 $K_o \sim R_{ub}$ 关系式(6)计算			根据 $K_o \sim U_m$ 关系式(5)计算		
平均值	范围	$R_{ub} = 0$ 时	平均值	范围	$U_m = 1$ 时
0.559	0.553~0.571	0.540	0.557	0.553~0.556	0.561

表5 上海软土 $K_o \sim R_{ub}$ 和 $K_o \sim U_m$ 经验关系的统计参数

$K_o \sim R_{ub}$ 关系或 $K_o \sim U_m$ 关系	统计特征值					
	n	r	$\hat{\sigma}_x$	$\hat{\sigma}_y$	Q	R_m (%)
$K_o = 0.540 + 0.398 R_{ub}$	67	0.67	0.107	0.049	0.153	4.39
$K_o = 1.011 - 0.455 U_m$	56	0.63	0.072	0.042	0.095	4.74

表中统计特征值符号意义:

n —子样容量; r —相关系数; $\hat{\sigma}_x$ —子样标准差;
 $\hat{\sigma}_y$ —方程标准差; Q —离差平方和; R_m —最大相对误差。

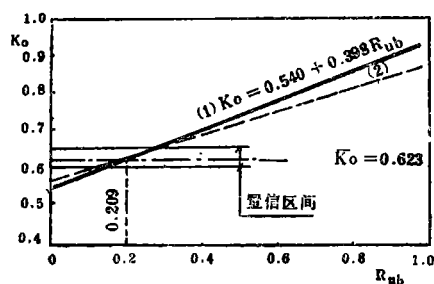


图6 上海软土的 $K_o \sim R_{ub}$ 关系

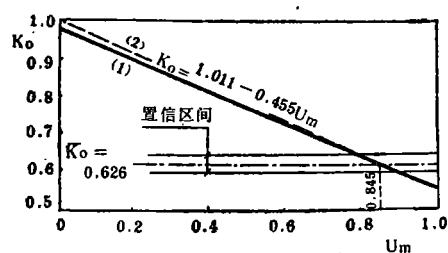


图7 上海软土的 $K_o \sim U_m$ 关系

对应于上列二式的曲线已分别示于图6、7中(图中之虚直线②)。从图中的①、②线对比可见, 它们之间的偏离仅发生在直线的两端, 这是容易理解的。

必须说明, 表4、5的结果是就上海软土地基的整个剖面的试验统计指标而言, 而不是

某一单个土样的必然结果。从这样的角度来观察 K'_0 和前述之 K_{0c} (图2、3、5)这两种不同试验方法所得的结果时, 可以看到进行控制 R_{u0} 试验所得之 K'_0 值平均约为0.540~0.571; 双面排水所得之 K_{0c} 则依不同取土地点而有所不同, 综合平均约为0.525~0.560。因此对于上海软土在整个剖面上观察时, K'_0 与 K_{0c} 之间比值约在1.029~1.017之间, 差别还不是很可观的。若仅对于淤泥质粘土的结果作对比时, K'_0 与 K_{0c} 比值则为0.95~0.92。

由于土的水平向应力不是竖向荷载的单一函数, 所以这里粗略对比中差别的原因, 除荷载及土类等因素外, 双面排水 K_{0c} 测定时的固结时间究应以多少为宜却是十分重要的。本文在按同一加荷方式的等应变连续加荷试验中固结时间取为8~10小时, 这对于轻亚粘土和亚粘土似尚可取, 而对于淤泥质粘土可能是嫌小了, 这也可能是使淤泥质粘土的 K'_0 与 K_{0c} 比值小于1的原因。我们感到这方面的研究工作还有赖于作专门的对比试验, 尤以用重塑土试样为宜, 其中包括作不同土类或不同状态土样的对比摸索。

六、结 束 语

根据研究结果: (1)获得上海软土各典型剖面上 K_0 系数的分布图; (2)获得 K_0 系数与应力历史的关系: 对于粘性土 $K_{0c} \sim R_{u0}$ 呈直线或半对数关系; 对夹砂的粘性土或砂性土则呈指数关系, 其指数 $m=0.52 \sim 0.57$; (3)上海软土在模拟动力条件下的 K_{0c} 值约为瞬间加荷“不排水”条件下的 K_{0c} 值的0.8倍; (4)采用应变控制连续加荷试验时, 可通过监测土样底部孔隙压力求取有效 K'_0 值, 当控制 $R_{u0}=0.15 \sim 0.25$ 或 $\bar{R}_{u0} \approx 0.20$ 时, 可使试验得到的 K'_0 值获得令人置信的结果。对于上海软土 (主体土层是淤泥质粘土) 其 K'_0 约等于0.560, 或者也可在 $K'_0=0.540 \sim 0.571$ 这一不大的范围内取值; (5)当在整个剖面上观察上海软土时, K'_0 与 K_{0c} 的比值约为1.029~1.017, 差别是不大的, 但这乃是十分粗略的。进一步的研究宜进行专门的对比试验包括固结时间的选取与不同土类与土样状态的对比摸索。

参 考 文 献

- [1] 徐志英: “土的静止侧压力系数的测定”, 土木工程学报, 1957年四卷2期。
- [2] 王钟琦: “土的侧压力系数问题”, 勘测通讯, 1958年第4期。
- [3] 姜朴: “砂土与粘土的静止侧压力系数研究”, 华东水利学院校庆十周年学术报告第18号
- [4] 魏道堦 郑大同: “上海地区天然地基沉降计算方法的探讨”, 同济大学科研部, 1964年9月。
- [5] 杨熙章 魏道堦: “土的静止侧压力系数自动测试仪的研制”, 同济大学学报, 1981年第3期。
- [6] 高大钊 魏道堦: “上海软土工程性质的概率统计特征”, 第四届全国土力学与基础工程学术会议交流资料, 1983年8月。
- [7] 魏道堦 胡中雄: “上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究”, 岩土工程学报, 1980年第4期。
- [8] M. Sherif & I. Ishibashi: Overconsolidation Effects on K_0 Values, Proc. 10th ICSMEF, Vol I, P.785
- [9] R. Smith & H. Wahls. Consolidation Under Constant Rate of Strain, Proc. ASCE, Vol 95, SM 2, 1969
- [10] 王正宏: “土的固结与压缩”, 土的工程性质第三章, 水利电力出版社, 1983年。