

上海地区土体静止侧压力系数的试验研究

胡立明

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:静止侧压力系数 K_0 是进行地下结构设计时必不可少的参数,准确确定 K_0 系数具有重要的工程意义。依托上海深隧工程,采用三轴仪开展 K_0 固结试验,研究不同加、卸载路径下土体 K_0 系数的变化规律,分析了几种常见的静止侧压力系数确定方法的适用性,并根据试验结果得到了新的预测公式。结果表明:(1)深部黏性土的 K_0 值在0.30~0.45之间,且与土层的先期固结压力成正比;(2)在取土引起的应力释放到再加载的过程中,部分试样的 K_0 值先减小至低于正常固结值,再增大并逐渐稳定;(3)采用经验公式估算 K_0 值时,土体内摩擦角宜采用正常固结时的有效峰值内摩擦角。

关键词:静止侧压力系数; K_0 固结试验;正常固结土;超固结土;先期固结压力

中图分类号: TU411.6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)05-0261-04

0 引言

静止侧压力系数(常用 K_0 表示)是岩土工程领域的重要参数,合理确定静止侧压力系数。才能够准确计算作用在地下结构物上的土压力,若 K_0 取值偏小,则计算得到的土压力偏小,对地下工程的安全不利;而取值过大的话又过于保守,不符合经济性的原则。因此,在基坑工程等地下工程的设计中发挥重要作用,准确确定 K_0 系数具有重要的工程意义^[1-3]。

鉴于此,众多学者和工程技术人员采用诸多方法对 K_0 系数进行测定。概括起来可分为直接测定和间接计算两种。直接测定是通过现场原位测试或室内土工试验直接测得无侧向变形条件下土体的有效水平应力及竖直应力,进而计算得到 K_0 系数。现场原位测试一般采用扁铲侧胀试验^[4-5]、旁压试验^[6]、孔压静力触探试验^[7]等。室内土工试验一般采用压缩仪法^[8-9]或三轴仪法^[10-12],其中三轴仪法可以更好地揭示土体在不同加卸荷路径下 K_0 系数的变化情况。间接计算通常是根据土体强度试验的相关结果(如土体有效内摩擦角等),利用所建立的经验公式计算 K_0 系数,但由于工程地质条件的特殊性,每个场地的土层条件都会有所不同,根据经验公式计算得到的 K_0 系数可能与场地实际的 K_0 系数存在误差,尤其对重要工程而言该方法适用性存在很大限制。

事实上,土体的 K_0 系数不仅会因土类别的不同

而有所不同,还会受到诸如埋深、应力历史、超固结比、颗粒级配、土体结构等诸多因素的影响^[13-15],是一个十分复杂的问题。另外,我国幅员辽阔,不同区域的土体静止侧压力系数也表现出很大不同。因此,有必要对重要工程进行 K_0 系数的专门测定。

随着上海城市建设的加速发展,相应深基坑工程如高层建筑的深基坑、隧道端头井等的数量和规模迅速增加,上海深隧工程结构底面的地层起伏很大,周围土体可能处于卸荷状态,也可能处于加载状态,因此受力状况十分复杂。为掌握深部土体的性状,本文采用GDS公司的三轴仪开展 K_0 固结试验,研究 K_0 系数在不同加卸荷路径下的变化规律,分析几种常见的静止侧压力系数确定方法的适用性,并根据试验结果给出新的预测公式。

1 工程概况

本工程为上海深隧工程,拟建工程主隧道西起苗圃绿地,大体沿苏州河走向埋设,东至福建北泵站(见图1),全长约15 km,管道内径约10 m,拟采用盾构法施工;沿线设置8处综合设施,基坑深度64~72 m;另配套二、三级系统总管及主干管,管道长度35 km(共8个分区,25个系统),管道内径3~6 m。根据工程需要,通过三轴仪开展了土体 K_0 系数的测定试验。

2 试验方法

2.1 试验设备介绍

试验采用GDS公司的三轴仪,该三轴仪采用压力/体积控制器作为围压及反压的压力源,精度为总

收稿日期:2020-11-25

作者简介:胡立明(1962—),男,学士,教授级高级工程师,从事岩土勘察专业研究工作。

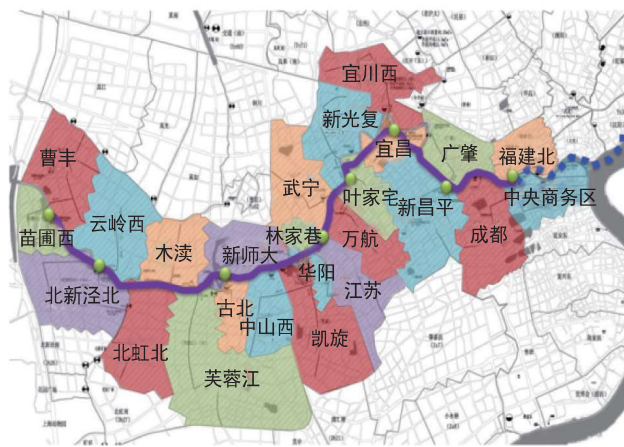


图1 隧隐工程位置示意图

量程的0.1%,试验全过程通过软件控制,数据亦可自动采集,自动化程度很高。

本试验固结控制方式基于式(1)确定,即:

$$\Delta V = \Delta H \cdot A_0 \quad (1)$$

式中: ΔV 为试样在固结阶段排出水的体积; ΔH 为试样的轴向变形量; A_0 为试样在初始状态下的横截面积。

试验过程中,数据采集系统会自动采集试样的排水量,采集间隔为1s。一旦发现式(1)不再满足时,系统会自动给反压控制器设置一个等量但方向相反的体变,在此过程中,还会通过调整围压以使反压保持不变。具体而言,当 $\Delta V < \Delta H \cdot A_0$ 时,使围压增大以加速排水;而当 $\Delta V > \Delta H \cdot A_0$ 时,则使试样冲水以减小围压。

2.2 试验过程

试验过程中,试样共分为两组:第一组试样共40个,首先加载到先期固结压力的1.5倍(见图2中的I+II阶段),然后进行不排水压缩,以获得正常固结土的强度;第二组试样共17个,首先加载到先期固结压力的附近,再卸荷到实际情况下的上覆土体应力(见图2中的I+III阶段所示),最后同样进行不排水压缩,以获得模拟施工情况下的应力路径的土体强度。试验中控制超固结比在1.18~1.33之间。

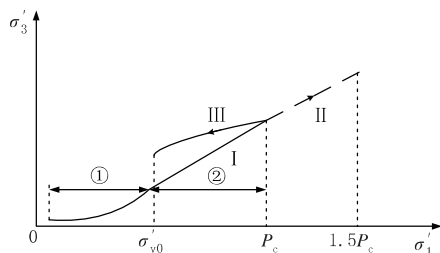


图2 固结过程示意图

试验过程中,加荷速率通过轴向应变率(设定在

0.25%/h左右)来进行控制,以确保超静孔压的及时消散。另外,为证实所设定的加载速率能够满足固结要求,关闭排水阀,测试固结完成后孔压的上升幅度。

图3为固结过程中试样轴向及侧向应变的变化规律。由图3可知, K_0 固结得以实现,且侧向变形被很好地控制。

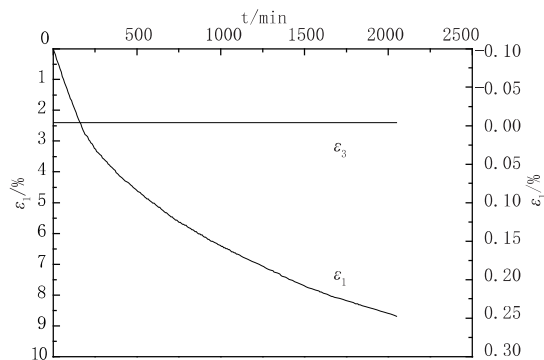


图3 固结过程中轴向应变与径向应变关系曲线

2.3 试验结果分析

2.3.1 正常固结土的 K_0 系数

K_0 系数的定义有多种表达形式,较为常用的是

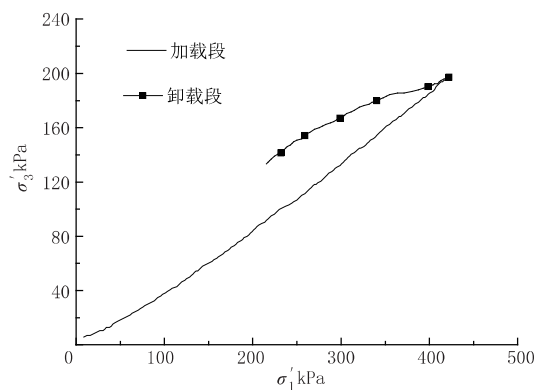
$$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v \quad (2)$$

式中: σ'_h 和 σ'_v 分别为水平向和竖向的有效应力。

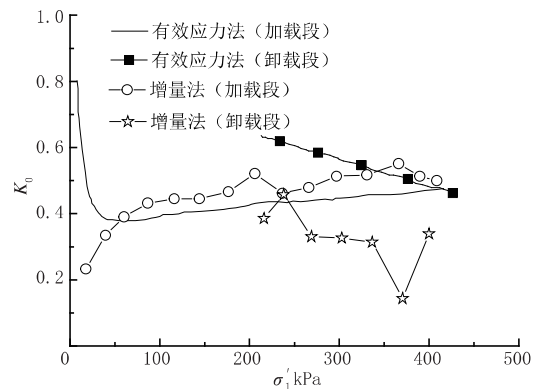
三轴试验中, σ'_v 和 σ'_h 分别对应有有效围压 σ'_1 和 σ'_3 ,当 σ'_v 和 σ'_h 呈线性关系时,两种表达方式是一致的。

图4为典型试样的试验曲线。由图4(a)可知, K_0 条件下连续加载或卸载时, σ'_1 与 σ'_3 并非总是呈线性关系。由图4(b)可知,采用上述两种方法得到的 K_0 值也差别很大。在采用有效应力法计算时, K_0 值从1开始,这是因为在饱和阶段给试样施加了等向有效应力;而采用增量法得到的 K_0 值则从0开始变化。随后,因取土过程中原位应力逐渐释放,土体由正常固结进入超固结状态, σ'_1 快速增大,采用有效应力法得到的 K_0 值迅速减小,而采用增量法计算得到的 K_0 值则有所增大。再之后, σ'_1 - σ'_3 关系曲线的斜率开始增大,并出现了反弯点,反弯点之后两者关系近乎满足线性,采用上述两种方法得到的 K_0 值也逐渐趋稳,但增量法下的 K_0 值相对而言更大。在III阶段,两种计算方法的差异更为显著,具体而言,增量法得到的 K_0 值在加载-卸载的转折点位置出现不连续突变,因此,应着重采用有效应力法计算 K_0 值。

正常固结土的 K_0 值随深度的变化规律见图5,由图5可知,淤泥或淤泥质粘土及粉质粘土的 K_0 值一般分别在0.40~0.55之间及0.30~0.45之间。



(a) σ'_1 - σ'_3 关系曲线



(b) 加载与卸载阶段的 K_0 值

图4 典型试样的试验曲线

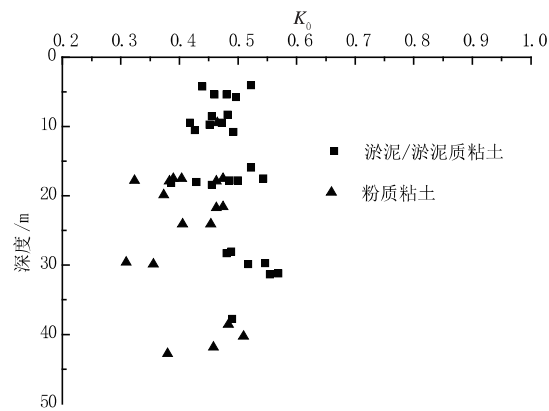


图5 正常固结土的 K_0 值随深度的变化规律

由于地基土应力历史的复杂性,土样所处深度事实上并不能真实反映其过去的应力状态。因此,本文绘制了 K_0 值与先期固结压力的关系曲线,见图 6,图中 P_c/P_a 为无量纲先期固结压力(P_c 为先期固结压力, P_a 为大气压)。由图 6 可知,正常固结情况下淤泥或淤泥质黏土的 K_0 值基本为一常数,约为 0.47,而随着 P_c/P_a 的增大,正常固结情况下粉质黏土的 K_0 值则逐渐增大。两种土的 K_0 值计算公式可分别表示为

对淤泥 / 淤泥质黏土:

$$K_0=6.06 \times 10^{-3} P_c / P_a+0.47$$

(3)

对粉质黏土:

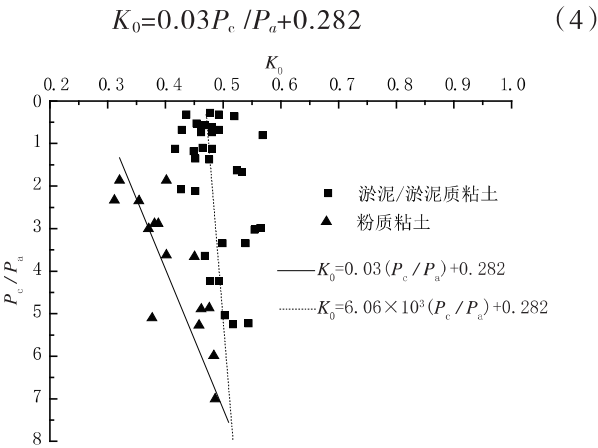


图6 K_0 值与先期固结压力的关系曲线

以往研究中多依据内摩擦角 φ' 建立原状粘土的 K_0 值计算经验公式,见表 1。但大多数文献并未指出 φ' 是采用峰值摩擦角 φ'_{peak} 还是残余摩擦角 φ'_{cr} 。在图 7 中,分别采用峰值摩擦角和残余摩擦角代入上述表中公式计算 K_0 值,并与试验结果进行对比,结果表明,由峰值内摩擦角 φ'_{peak} 得到的 K_0 值与试验结果更为接近。

表1 正常固结黏土 K_0 值计算经验公式

土体类型	公式	
伦敦黏土	$K_0=0.95-\sin \varphi'$	(a)
高岭土	$K_0=\frac{1-\sin 1.15\left(\varphi'-9\right)}{1+\sin 1.15\left(\varphi'-9\right)}$	(b)
意大利黏土	$K_0=\frac{1-\sin 0.64 \varphi'}{1+\sin 0.64 \varphi'}$	(c)
黏土	$K_0=\frac{1-\sin \varphi' \sqrt{2}}{1+\sin \varphi' \sqrt{2}}$	(d)
英国黏土	$K_0=\frac{1-\sin \left(\varphi'-11.5\right)}{1+\sin \left(\varphi'-11.5\right)}$	(e)
上海经验	$K_0=0.95-\sin \varphi'$	(f)

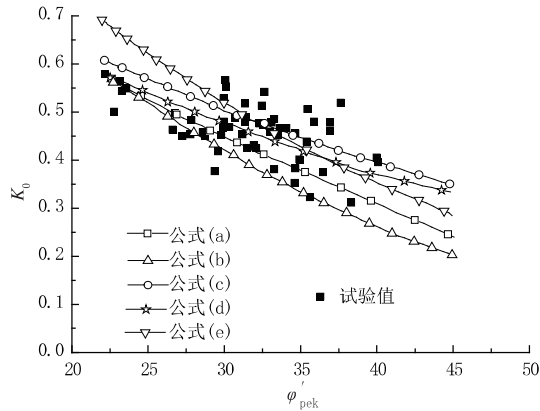
2.3.2 超固结土的 K_0 系数

本次试验中,I、Ⅲ阶段土样为超固结状态, K_0 值表现出的规律如下:

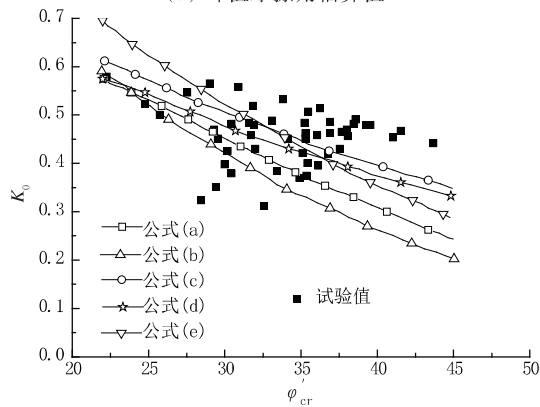
I 阶段:土体固有的胶结作用使得土体的结构强度得到提升,从而使试样的抗侧向变形能力得到增强,而另一方面,水平向应力的增长较为缓慢,导致该阶段初期应力表现出明显的非线性特性。受此影响,原状土试样的 K_0 值从 1 逐渐减小至正常固结试样的 K_0 值,见图 8(a);而少量试样的 K_0 值会减小到低于正常固结土的 K_0 值,然后再增大直至稳定,见图 8(b)。

Ⅲ阶段:第Ⅲ阶段的试验结果见图 9,由图 9 可知, K_0 值随着超固结比 OCR 的增大而逐渐增大。

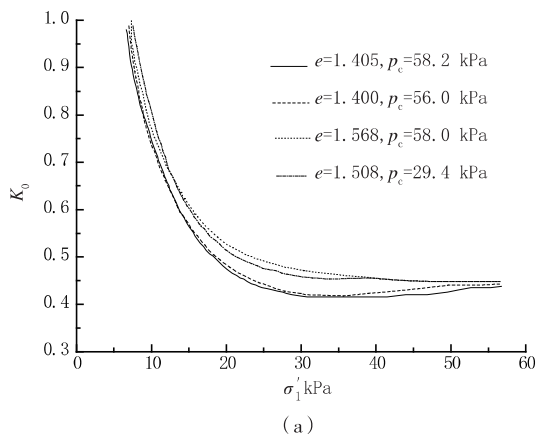
可采用式(5)计算超固结土在卸荷状态下的



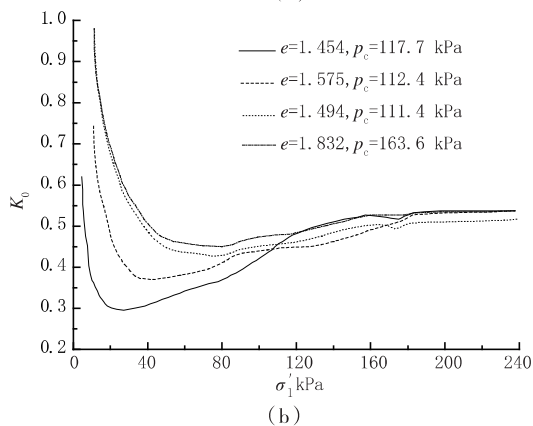
(a) 峰值摩擦角估算值



(b) 残余摩擦角估算值

图7 K_0 估算值与试验值的对比

(a)



(b)

图8 不同试样 K_0 值随应力的变化情况

K_0 值:

$$K_{0(\text{超})} = K_{0(\text{正})} (OCR)^n \quad (5)$$

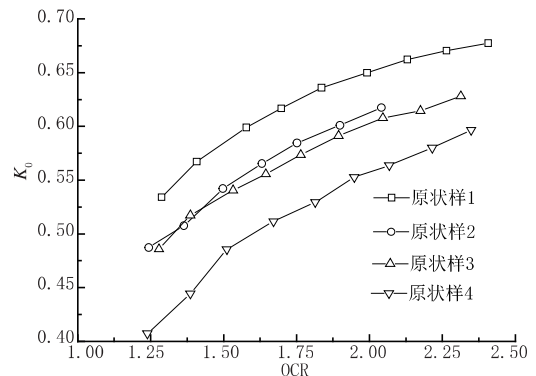


图9 与 OCR 关系曲线

式中: $K_{0(\text{超})}$ 和 $K_{0(\text{正})}$ 分别表示正常固结土及超固结土的静止侧压力系数; n 为常数, 与土体性质有关。

根据卸荷试验的结果, 对淤泥或淤泥质黏土而言, 一般在 0.547 ~ 0.772 之间, 而粉质黏土的值一般在 0.434 ~ 0.632 之间。

3 结论

本文通过三轴试验研究了加载及卸载路径下土体静止侧压力系数 K_0 值的变化规律, 相关结论如下:

(1) 深部黏性土层的 K_0 值一般在 0.30 ~ 0.45 之间, 且与先期固结压力成正比。

(2) 黏性土固有的胶结作用使其结构强度得到提高, 从而增强了试样抵抗侧向变形的能力。

(3) 从取土引起的应力释放到再加载, 部分土样的 K_0 值会先减小再增大直至逐渐稳定, 这可能与土体的结构性相关。

(4) 在通过已有经验公式估算 K_0 值时, 宜采用正常固结土的有效峰值内摩擦角作为内摩擦角进行计算。

参考文献:

- [1] 黄博, 胡俊清, 廖先斌, 等. 原状饱和黏土静止土压力系数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 4056-4064.
- [2] 应宏伟, 王小刚, 张金红. 考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 118-124.
- [3] 蒋明杰, 朱俊高, 梅国雄. 粗粒土静止侧压力系数影响因素试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(3): 142-148.
- [4] 唐世栋, 肖勇, 王松平. 杭州地区用扁铲侧胀试验求解静止侧压力系数 K_0 的研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(7): 5-9.
- [5] 黄勇, 刘干斌, 陈斌, 等. 宁波地区浅层土静止土压力系数 K_0 的确定方法[J]. 工程勘察, 2016, 44(6): 11-17.
- [6] 童立元, 刘松玉, 张焕荣, 等. 应用 SCPTu 确定静止土压力系数的试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 117-123.
- [7] 耿巧巧, 陈妍, 蔡国军, 等. 基于 CPTU 原位测试的深基坑工程中黏性土静止土压力系数的评价研究[J]. 工程勘察, 2019, 47(9): 1-6.
- [8] 李国维, 胡坚, 陆晓琴, 等. 超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2198-2205.

(下转第 293 页)



图 7 交通渠化模拟图

3 结 语

道路接入点处,交通流发生变化,容易产生交通事故。利用 BIM 技术可以直观地展示场地现状,分析接入需求。开展接入点处的三维设计,直观地展示了设计成果,方便进行成果评估。下一步将 BIM 设计成果导入交通分析软件,评估通行效率、净空需求,将

能进一步体现 BIM 技术的优势。相信随着 BIM 技术的发展,基于三维模型和数据的分析将会越来越完善,BIM 技术将促进交通事业更好地发展。

参考文献:

[1] 刘辉,章国鹏,王羿童,江欣国.无控制交叉口交通安全影响因素分析[J].公路交通科技,,2019,36(9):110-116.
[2] 王菲华,郝雪峰.接入管理技术在道路交通安全中的应用[J].交通科技与经济,2008(6):5-7.
[3] Committee of Access Management. Access management manual [M]. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2003
[4] 樊华. 城市道路受接入影响延误模型研究[D].武汉:武汉理工大学, 2019.
[5] 王晓安,陈瑶,李昊明,计斌.平交和接入式涉路工程风险源识别与分析[J].价值工程,2020,39(13):244-245.

(上接第 264 页)

[9] 莫玮宏,陈晓平,罗庆姿. K_0 等比固结条件下软土的变形[J].岩土工程学报,2013,35(增 2):798-803.
[10] 程海涛,刘保健,谢永利.压实黄土连续加载 K_0 固结特性[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增 1):3203-320.
[11] 代云霞,林荃.饱和黏性土静止土压力系数变化规律探讨[J].中国港湾建设,201,38(4):12-16.
[12] 纠永志,黄茂松.超固结软黏土的静止土压力系数与不排水抗剪强

度[J].岩土力学,2017,38(4):951-957.
[13] 王秀艳,唐益群,藏逸中,等.深层土侧向应力的试验研究及新认识[J].岩土工程学报,2007,29(3):430-435.
[14] 李国维,胡坚,陆晓岑,等.超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数[J].岩土工程学报,2012,34(12):2198-2205.
[15] 强跃,赵明阶,林军志,等.静止土压力系数探究[J].岩土力学,2013,34(3):727-730.