

基坑降水对土侧压力系数的影响

丁春林¹, 张小伟², 朱 恺¹, 叶 丹¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 针对上海软土深基坑开挖降水过程中所涉及的③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土、⑤-1 层粉质黏土、⑤-2 层黏质粉土, 通过二阶段固结模拟和 K_0 试验, 研究了各层土在不同降水深度条件下土侧压力系数的变化特性. 试验结果显示: 降水前后, 黏性土侧压力系数值相对粉性土为大; 各层土侧压力系数值均随水位降深的增加而减小, 每米水位降深, ⑤-1 层、⑤-2 层、③层、④层土的侧压力系数值分别下降 3.1%, 2.5%, 2.3%, 1.3% 左右; 随着降水深度的增大, 降水对侧压力系数的影响在逐渐减小, 并最终趋于稳定. 最后, 基于回归分析理论得到侧压力系数简易计算公式, 为上海地区深基坑降水后土侧压力系数的确定提供参考.

关键词: 基坑降水; 侧压力系数; 二阶段固结法; K_0 试验; 简易计算

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental Study on Influence of Foundation Pit Dewatering on Lateral Pressure Coefficient of Soil

DING Chunlin¹, ZHANG Xiaowei², ZHU Kai¹, YE Dan¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the layer 3 mucky silty clay, the layer 4 mucky clay, the layer 5-1 silty clay and the layer 5-2 clayey silt involved in the process of excavation and dewatering of deep foundation pit in soft soil stratum of Shanghai, a study was made on the variation characteristics of the lateral pressure coefficient for the soil layers in different drawdown through the two step consolidation method and K_0 test. The test results show that the lateral pressure coefficient value of the clay is larger than that of the silt before and after dewatering. The lateral pressure coefficient of the soil

decreases with the increasing of the drawdown, and the lateral pressure efficient value of the layer 5-1, the layer 5-2, the layer 3 and the layer 4 decreases about 3.1%, 2.5%, 2.3% and 1.3% per meter drawdown respectively. As the drawdown increases, the influence of dewatering on the lateral pressure coefficient is decreasing gradually, and finally the lateral pressure coefficient tends to be stable. In the end, the simple calculation formulas of the lateral pressure coefficient were obtained based on the theory of regression analysis, providing reference for the determination on the lateral pressure coefficient of the soil after dewatering of the deep foundation pit in Shanghai.

Key words: foundation pit dewatering; lateral pressure coefficient; two step consolidation method; K_0 test; simple calculation

土侧压力系数 K_0 是指土体在无侧向变形条件下, 侧向有效应力与垂向有效应力之比, 它是反映地基土中水平向应力变化的重要力学指标. 侧压力系数是用来计算土体变形, 确定地下围护结构和挡土结构土压力以及桩基侧向摩擦阻力所必须的基本参数^[1-3], 它广泛应用于基坑工程、重力式挡土墙、堤坝、矿山、隧道、土体变形等实际工程的设计计算中^[4-6], 并受到土木和岩土工程领域专家们的高度重视. 为此, 国内外学者们也开展了大量的室内试验、现场试验和理论分析研究^[7-9], 提出过一些 K_0 的测定方法、经验计算公式及理论推导公式^[10-12]. 然而, 影响土侧压力系数的因素比较多, 如文献[13]研究表明: 土的侧压力系数 K_0 值与土黏粒含量和塑性指数 I_p 有关, 且随土黏粒含量或 I_p 值的增大而增大; 同时, 通过对土样进行三轴固结不排水剪切试验发现, 有效内摩擦角较大的土, K_0 值较小; 反之, 有

收稿日期: 2010-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(40772178)

第一作者: 丁春林(1968—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下工程及岩土工程. E-mail: chunlinding308@tongji.edu.cn

效内摩擦角愈小, K_0 值愈大. 文献[14]研究了砂土处于松散、中密和密实状态下的侧压力系数 K_0 值, 研究表明: 松散状态下砂土的 K_0 值比密实状态下要大. 文献[15]研究表明: 软黏土的侧压力系数 K_0 具有阶段性特征, 当试验荷载小于试样的残余结构强度 P'_c 时, K_0 值较小, 反之 K_0 值较大. 文献[16]研究了非饱和膨胀土侧压力系数与饱和度和径向应力之间关系, 研究结果显示: 在饱和度比较小的情况下, 非饱和膨胀土的轴向应力—径向应力曲线呈现非线性关系, 它随着初始饱和度和径向应力的增大而增大. 工程实践中, 侧压力系数取值的合理性直接关系到模型计算的准确性, 以及设计施工的经济性与安全可靠.

对于沿海软土富水地层的深基坑, 基坑开挖常常要采取降水措施, 而基坑降水一方面会导致含水层中孔隙水压力降低, 有效应力增大, 含水层产生压密; 另一方面, 基坑降水使原有的渗流场遭到破坏, 产生新的渗流, 伴随着渗流作用而施加于土骨架的渗透力, 也使土体压密. 土体压密后, 其密实度、含水量和结构都会发生改变, 从而土的侧压力系数也随之发生变化. 在软土富水地层深基坑的设计计算中,

目前侧压力系数 K_0 的选取大多采用降水前的材料参数, 没有考虑基坑降水对土侧压力系数的影响, 而且关于基坑降水土侧压力系数方面的研究也比较少, 侧压力系数 K_0 值往往仅凭经验选取, 有时与实际相差较远, 其结果显然不够合理. 本次研究, 针对上海软土深基坑开挖降水过程中广泛涉及的③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土、⑤-1 层粉质黏土和⑤-2 层黏质粉土, 通过二阶段固结模拟和 K_0 试验, 研究各层土在不同水位降深条件下土侧压力系数的变化, 为基坑设计计算参数的确定提供依据.

1 土侧压力系数试验

1.1 试验取土

本次试验的土样为原状土, 取自上海市区某深基坑. 该地基土属典型的滨海相沉积, 分布稳定, 主要由饱和黏性土、粉性土及砂土组成. 试验取土涉及③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土、⑤-1 层粉质黏土和⑤-2 层黏质粉土. 各层土基本特性参数见表 1.

表 1 试验土层基本参数
Tab.1 Basic parameters of test layers

土层号	土层名称	埋深/m	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均含水率/%	平均自重应力/kPa
③	灰色淤泥质粉质黏土	3.2~9.5	17.5	30.3	60.0
④	灰色淤泥质黏土	9.5~17.5	16.7	41.2	100.0
⑤-1	灰色粉质黏土	17.5~22.0	17.5	39.5	150.0
⑤-2	灰色黏质粉土	22.0~33.6	18.1	29.7	200.0

1.2 试验方案

根据基坑地下水位和各层土埋深, ③层淤泥质粉质黏土和⑤-2 层黏质粉土模拟了 3 种水位降深(0, 2, 4 m), 对应的固结压力分别为 60, 80, 100 kPa 和 200, 220, 240 kPa; ④层淤泥质黏土和⑤-1 层粉质黏土模拟了 4 种水位降深(0, 2, 4, 8 m), 对应的固结压力分别为 100, 120, 140, 180 kPa 和 150, 170, 190, 230 kPa; 每层土做 2—3 组试验.

1.3 试验方法与步骤

为了模拟基坑降水对土侧压力系数的影响, 试验通过二阶段固结法模拟降水后土体前期固结压力的增长. 第一次固结是土体在天然自重应力状态下完成, 第二次固结是按降水后土体有效应力增长进行; 两次固结的时间均为 24 h, 进而在此基础上进行 K_0 试验.

土侧压力系数 K_0 的测定采用如图 1 所示的试验仪, 参照土工试验规范中侧压力系数试验方法进行, 主要包括试样制备、固结、安装、加载、记录数据等试验步骤^[17]. 其中, 试样采用内径 61.8 mm、高 40.0 mm 的 K_0 切土环刀切取原状土试样(图 2); 不考虑降水的试样只进行 1 次固结, 考虑降水的试样进行二阶段固结, 每次固结 24 h; 向 K_0 容器内安装试样, 首先用负压法使 K_0 容器的乳胶膜向内壁凹进, 并在乳胶膜上涂硅油以减少试样与乳胶膜的摩擦, 再用传压活塞将固结完成的土样从环刀推入 K_0 容器内, 试样安装完毕, 向容器注射水消除负压, 使乳胶膜紧贴土样; 试验加载采用 50, 100, 200, 300, 400 kPa 5 个等级, 每个等级荷载加压的稳定时间为 2 h. 试验结束, 取出试样称重, 测含水率, 最后绘制竖向有效应力—侧向有效应力曲线得到 K_0 值.

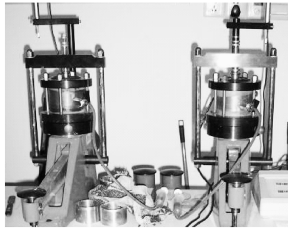
图1 K_0 测定试验仪Fig.1 K_0 measurement tester

图2 试样制作照片

Fig.2 Photo of sample production

2 试验结果与分析

2.1 土侧压力系数分析

图3是根据试验数据整理得到的各层土在不同降水条件下部分试样的 $\sigma'_1 - \sigma'_3$ 拟合曲线(即竖向有效应力—侧向有效应力曲线).限于篇幅各层土其他试样的拟合曲线略去.表2是根据 $\sigma'_1 - \sigma'_3$ 拟合曲线整理得到的各层土在不同降水条件下的侧压力系数.由表2和图3分析可知:各层土在未降水情况下的侧压力系数 K_0 值与规范经验值^[18]基本吻合,且降水前后,黏性土的 K_0 值相对粉性土 K_0 值为大,这主要是黏性土含水率相对较高,可塑性好,土体 K_0 值相对较大.土体的侧压力系数 K_0 值一般随着水位降深的增加而减小,且初始含水量越大,降水引起的侧压力系数 K_0 下降速率越快.

2.2 水位降深对土侧压力系数的影响

图4是根据试验结果整理得到的不同土层侧压力系数随水位降深的变化关系曲线.由图4和表2分析可知:各层土侧压力系数 K_0 值均随水位降深的增加而呈现减小的趋势,其中降水对⑤-1层土影响最大,每米水位降深侧压力系数 K_0 值平均下降3.1%;⑤-2层土、③层土影响次之,每米水位降深侧压力系数 K_0 值分别下降2.5%和2.3%左右;④层土影响较小,每米水位降深侧压力系数 K_0 值下降1.3%左右.随着降水深度的增大,侧压力系数 K_0 变化曲线的斜率在不断减小,降水对侧压力系数的影

响也在逐渐减小,分析原因是降水后土体固结压密、孔隙比越来越小,侧压力系数的变化也越来越小,最后趋于稳定.

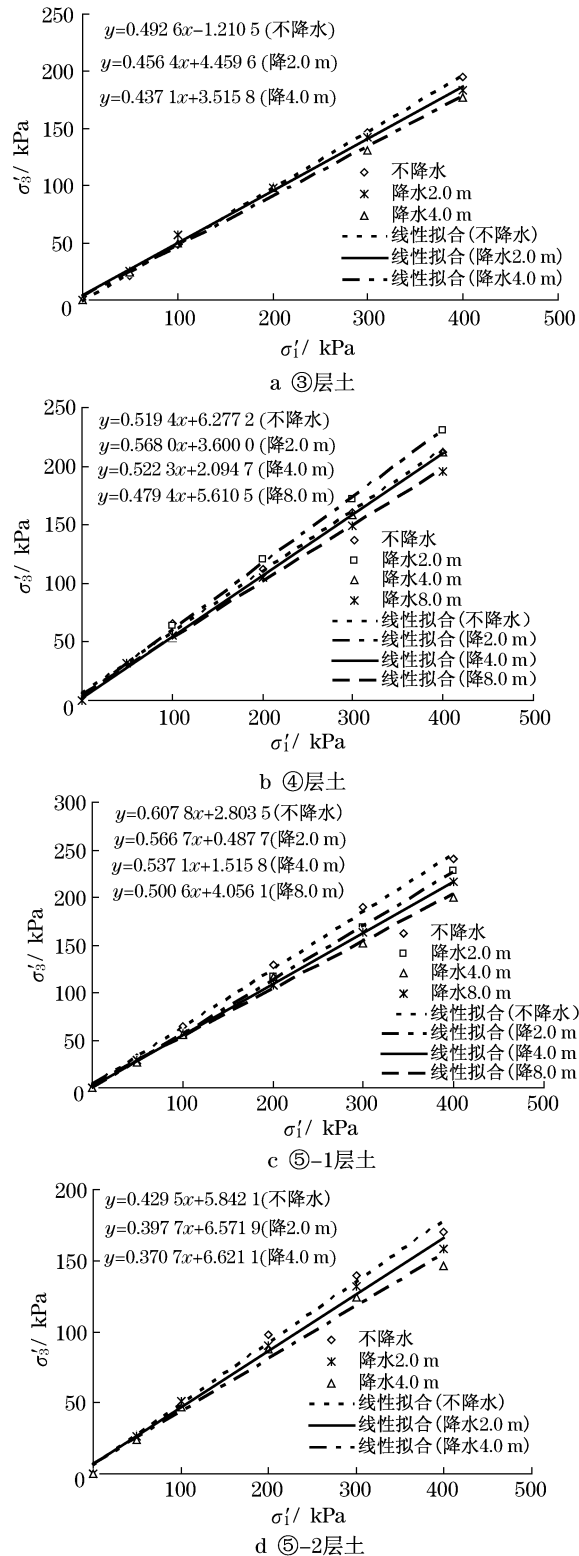


图3 各层土在不同降水条件下试样的 $\sigma'_1 - \sigma'_3$ 拟合曲线
Fig.3 Fitting curves of $\sigma'_1 - \sigma'_3$ of the layers in different drawdown

表 2 不同水位降深各层土侧压力系数 K_0 值
Tab.2 Lateral pressure coefficient K_0 of the layers in different drawdown

土层号	降水深度/m	固结压力/kPa	试样初始含水率/%			侧压力系数 K_0 值			K_0 平均值	K_0 相对值/%
			第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组		
③	0	60.0				0.49	0.45	0.54	0.49	100.0
	2.0	80.0	29.3	30.5	31.2	0.46	0.46	0.47	0.46	94.5
	4.0	100.0				0.44	0.45	0.47	0.45	90.8
④	0	100.0				0.52	0.59	0.64	0.58	100.0
	2.0	120.0	42.0	41.0	40.3	0.57	0.58	0.58	0.57	99.4
	4.0	140.0				0.52	0.57	0.55	0.54	93.9
⑤-1	0	150.0				0.65	0.64	0.61	0.63	100.0
	2.0	170.0	40.3	38.5	39.7	0.64	0.54	0.57	0.58	93.3
	4.0	190.0				0.53	0.50	0.54	0.52	83.7
⑤-2	0	200.0				0.43	0.42	—	0.42	100.0
	2.0	220.0	30.4	29.0	—	0.40	0.38	—	0.39	95.1
	4.0	240.0				0.37	0.37	—	0.37	90.2

注:各层土相对值指相对于各层土降水深度为 0 m 时的值.

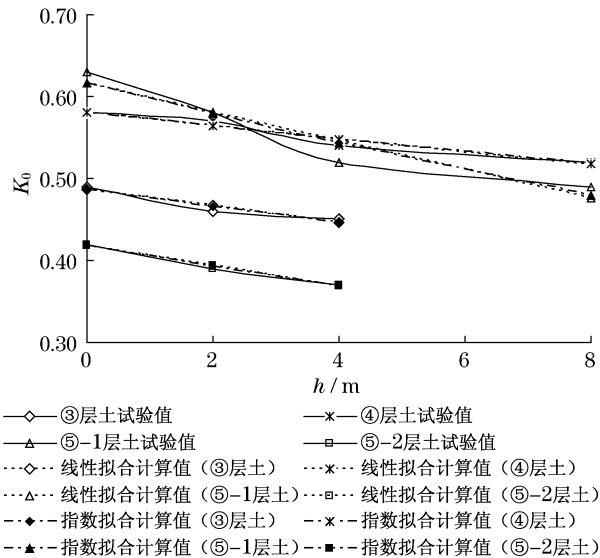


图 4 各层土侧压力系数 K_0 随降水深度 h 变化关系

Fig.4 Relation of lateral pressure coefficient of the layers and drawdown

2.3 降水土侧压力系数简易计算方法

为了探讨上海软土地层各层土侧压力系数与基坑降水深度之间的简易计算关系式,本文采用回归理论进行了分析.表 3 是根据试验数据采用线性拟合和指数曲线拟合得到的简易计算公式.

由表 3 分析可知,各层土侧压力系数的线性拟合公式和指数曲线拟合公式的拟合优度判定系数 R^2 值分别在 0.91 和 0.92 以上,接近于 1.0.说明拟合效果均较好,且指数曲线拟合稍优于线性拟合.线性拟合公式和指数曲线拟合公式计算值与试验值比较如图 4 所示.分析可知,线性拟合和指数曲线拟合公式计算值与试验值均比较吻合.

3 结论

通过对上海软土深基坑降水所涉及的③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土、⑤-1层粉质黏土和

表 3 各层土侧压力系数随降水深度变化的拟合计算公式
Tab.3 Fitting calculation formulas of lateral pressure coefficient of each layer

土层号	线性拟合		指数曲线拟合	
	公式	拟合优度系数 R^2	公式	拟合优度系数 R^2
③	$y = -0.010\ 0x + 0.486\ 7$	0.92	$y = 0.486\ 6\ e^{-0.021\ 3x}$	0.93
④	$y = -0.007\ 9x + 0.580\ 0$	0.95	$y = 0.580\ 3\ e^{-0.014\ 3x}$	0.95
⑤-1	$y = -0.017\ 4x + 0.616\ 0$	0.91	$y = 0.616\ 8\ e^{-0.031\ 5x}$	0.92
⑤-2	$y = -0.012\ 5x + 0.418\ 3$	0.99	$y = 0.418\ 5\ e^{-0.031\ 7x}$	0.99

注:表中 y 表示侧压力系数 K_0 ; x 表示水位降深 h ,m.

⑤-2层黏质粉土的 K_0 试验分析,可得到以下几点结论:

(1)各层土在未降水情况下的侧压力系数 K_0 值与规范值基本吻合,降水前后,黏性土的 K_0 值相对粉性土 K_0 值为大,原因在于黏性土含水率相对较高,可塑性较好,侧压力系数 K_0 值相对大些.

(2)各层土侧压力系数 K_0 值均随水位降深的增加而减小.降水时,⑤-1层土 K_0 值下降最快,⑤-2层土、③层土次之,④层土下降最慢.可见,降水对含水量大、渗透性好的粉性土影响较大,而对渗透性差的黏性土影响较小.

(3)随着降水深度的增大,各层土侧压力系数 K_0 值变化在不断减小,降水对侧压力系数的影响也在逐渐减小,并最终趋于稳定.

(4)根据试验结果拟合得到的降水土侧压力系数简易计算公式,其计算值与试验值比较吻合,且指数曲线拟合效果稍优于线性拟合,这些拟合公式应用于类似工程具有一定参考价值.

参考文献:

- [1] Chai J C, Carter J P, Hayashi S. Ground deformation induced by vacuum consolidation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1552.
- [2] HUANG Chingchuan, LUO Woeiming. Behavior of soil retaining walls on deformable foundations [J]. Engineering Geology, 2009, 105(1): 1.
- [3] Shelke A, Patra N R. Effect of arching on uplift capacity of single piles [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(3): 365.
- [4] Paik K H, Salgado R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects [J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 643.
- [5] Tsukamoto Y, Ishihara K, Kon H, et al. Use of compressible expanded polystyrene blocks and geogrids for retaining wall structures [J]. Soils and Foundations, 2002, 42(4): 29.
- [6] Wijewickreme D, Karimian H, Honegger D. Response of buried steel pipelines subjected to relative axial soil movement [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(7): 735.
- [7] Wei L, Tumay M T, Abu - Farsakh M Y. Field testing of inclined cone penetration [J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(1): 31.
- [8] Kurup P U, Griffin E P. Estimating overconsolidation ratio and lateral stress coefficient using neural networks [C]//Site and Geomaterial Characterization (GSP 149), Shanghai: ASCE, 2006, 249 - 254.
- [9] 王秀艳, 唐益群, 臧逸中, 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.
WANG Xiuyan, TANG Yiqun, ZANG Yizhong, et al. Experimental studies and new ideas on the lateral stress in soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 430.
- [10] 董孝璧. 确定土侧应力系数 K_0 的方法研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(4): 27.
DONG Xiaobi. Study on the methods to determine lateral stress ratio of soils K_0 [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1998, 9(4): 27.
- [11] 史宏彦, 谢定义. 确定无黏性土静止土压力系数的一个理论公式 [J]. 水利学报, 2001(4): 85.
SHI Hongyan, XIE Dingyi. A formula to determine the lateral pressure coefficient of cohesionless soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(4): 85.
- [12] Wanatowski Dariusz, Chu Jian. K_0 of sand measured by a plane-strain apparatus [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(8): 1006.
- [13] 李晓萍, 赵亚品. 静止侧压力系数及其试验方法的探讨 [J]. 铁道工程学报, 2007(8): 20.
LI Xiaoping, ZHAO Yapin. Discussion on the still lateral pressure coefficient and testing method [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(8): 20.
- [14] Uncuoglu Erdal, Laman Mustafa, Saglamer Ahmet, et al. Prediction of lateral effective stresses in sand using artificial neural network [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(2): 141.
- [15] 赵玉花, 沈日庚, 李青. 软黏土侧压力系数 K_0 阶段性特征研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1264.
ZHAO Yuhua, SHEN Rigeng, LI Qing. Research on staged characteristics of lateral pressure coefficient K_0 of soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1264.
- [16] ZHANG Rui, ZHENG Jianlong, YANG Heping. Experimental study on K_0 consolidation behavior of recompacted unsaturated expansive soil [C]//Recent Advancement in Soil Behavior, In Situ Test Methods, Pile Foundations, and Tunneling (GSP 192), Changsha: ASCE, 2009. 27 - 32.
- [17] 袁聚云. 土工试验原理 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
YUAN Juyun. The theory of geotechnical test [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003.
- [18] 上海市勘察设计院. 基坑工程设计规程 [S]. 上海: 上海市建设委员会, 1997.
Shanghai Exploration & Design Trade Association. Code for design of excavation engineering [S]. Shanghai: Shanghai Construction Council, 1997.