

# $K_0$ 应力路径试验在上海地区工程勘察中的应用

冯雪威

(上海市岩土地质研究院有限公司, 上海 200072)

**摘要:**上海地区在进行软粘性土的变形特性试验时,勘察过程中极少进行对原状土在不同应力路径下的变形及强度试验研究,这使得报告中提供的参数不能很好地和基坑开挖卸荷过程中土体地层的实际相吻合。本文以上海市徐家汇某深大基坑项目为例,在勘察阶段进行  $K_0$  应力路径三轴试验,试验内容为对选取的代表性土样进行加荷、卸荷及再加荷,并记录各阶段的应力应变及变形模量。对试验结果的分析表明,应力路径对软粘性土的影响较明显, $K_0$  应力路径可以较为真实地反映土体在天然状态下进行基坑开挖过程中的变形特性。建议以后在对变形敏感的深大基坑工程中加强推广应用。

**关键词:**岩土工程勘察;深大基坑;软粘性土; $K_0$  应力路径;变形特性;上海地区

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2019)04-0070-05

## Application of $K_0$ stress path test in engineering investigation in Shanghai

FENG Xuewei

(Shanghai Geotechnical Engineering & Geology Institute Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In the test of deformation characteristics of soft clay soil in Shanghai, the test of deformation and strength of undisturbed soil under different stress paths is rarely carried out in engineering investigation, which makes the parameters provided in the investigation report not well consistent with the actual soil stratum in the excavation and unloading process of foundation pit. In this paper, taking a deep foundation pit project in Xujiahui, Shanghai for example,  $K_0$  stress path triaxial test was performed in the investigation stage. The test included loading, unloading and then re-loading of the selected representative soil samples, and recording the stress and strain as well as modulus of deformation at every stage. The analysis of the test results shows that the stress path had an obvious effect on the soft clay soil, and the  $K_0$  stress path can reflect the deformation characteristics of the soil in the process of foundation pit excavation in the natural state. It is suggested to strengthen the promotion and application of the  $K_0$  stress path in the deep and large foundation pit projects which are sensitive to deformation.

**Key words:** geotechnical investigation; deep foundation pit; soft clay soil;  $K_0$  stress path; characteristics of deformation; Shanghai

## 0 引言

上海市对地下空间的开发利用一直在不断的挑战勘察设计水平的新高度,常规的勘察手段及试验参数逐渐无法满足复杂环境下深大基坑的变形设计要求。上海地区位于长江三角洲入海口东南前缘,浅部普遍分布有厚度较大的软粘性土<sup>[1]</sup>。软粘性土具有含水量高、压缩性高、灵敏度高、孔隙比大、抗剪强度低等特点<sup>[2-4]</sup>,在基坑开挖过程中极易产生变形,引发工程安全事故<sup>[5-6]</sup>。对土的变形特性研究

发现,其变形特点不仅与土的组成、结构、物理状态等基本特性有关,还与土的受力条件,即应力路径、应力历史密切相关<sup>[7-9]</sup>。因此,基坑工程的勘察阶段必须针对工程性质,并结合地基土特性,采取代表性的土样,在符合或接近实际应力状况的条件下进行试验,才能获得较为真实的应力变形计算指标,为后续设计阶段提供更为精准、可靠的地质勘察资料<sup>[10-11]</sup>。

上海地区在进行软粘性土的变形特性试验时,

收稿日期:2019-01-07; 修回日期:2019-03-04 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.04.012

作者简介:冯雪威,女,汉族,1987年生,工程师,岩土工程勘察专业,硕士,主要从事岩土工程勘察及相关工作,上海市静安区灵石路930号地质大厦3楼311,592007894@qq.com。

引用格式:冯雪威. $K_0$  应力路径试验在上海地区工程勘察中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):70-74,79.

FENG Xuewei. Application of  $K_0$  stress path test in engineering investigation in Shanghai[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(4): 70-74, 79.

普遍采用侧限压缩试验(亦称固结试验),有时也采用常规三轴压缩试验(亦称三轴剪切试验),上述试验由于侧向压力保持不变,当施加的竖向力增大到某一值后,变形参数结果往往失真,而  $K_0$  应力路径下的三轴压缩试验则不受施加荷载大小的限制,加压或卸荷过程中始终保持  $K_0$  状态,可以较为真实地反映土体在天然状态下的变形情况<sup>[12-15]</sup>。但受实验室水平、工程造价及技术人员固有思维的限制,勘察过程中极少进行对原状土在不同应力路径下的变形及强度试验研究,这使得报告中提供的参数不能很好地和基坑开挖卸荷过程中土体的实际变化相吻合<sup>[16-17]</sup>。因此工程勘察技术人员非常有必要加强了解不同应力路径下卸荷三轴试验的原理及影响,并可以准确地应用到深大基坑项目工程勘察设计的实际工作中去。

本文以上海市徐家汇某深大基坑项目为例,介绍该项目基坑开挖及影响深度内粘性土在  $K_0$  应力路径下的三轴加荷—卸荷—再加荷试验成果,并进行简要的分析讨论。

## 1 工程概况

上海市徐家汇某深大基坑项目位于上海繁华的徐家汇商业区,场地周边主要为高层商业办公楼或住宅楼,东侧邻近地铁 11 号线徐家汇站,且场地内北侧下方为地铁 9 号线区间隧道,周边环境极其复杂。本工程场地内下设有 -1~-6 层整体地下室,开挖深度一般在 6~32 m,局部最深约 37 m,基坑安全等级属于一级,地下建筑面积约 250000 m<sup>2</sup>,属于典型的深大基坑工程。

本工程场地属于上海地区五大地貌单元中的滨海平原地貌类型,依据勘察揭遇地层资料,场地位于古河道沉积区,普遍缺失暗绿色粘性土,相应沉积了较厚的灰色粘性土,基坑开挖及影响深度范围内(按 2.5 倍开挖深度考虑)主要地基土物理力学性质参数详见表 1,从表中可知,浅部软粘性土明显具有含水量高、压缩性高、孔隙比大、强度低等典型软土的工程地质特性,上述软弱土层在基坑开挖时坑底会产生一定程度的卸荷回弹,特别是本项目位于地铁 9 号线上, -1F 地下室基坑开挖时由于卸荷作用,

表 1 主要土层物理力学性质参数

Table 1 Major parameters of soil physical and mechanical properties

层号	土层名称	埋藏深度 范围/m	含水 量/%	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙比 $e$	液性指 数 $I_L$	固结快剪(峰值)		压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$
							$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$		
②	褐黄—灰黄色粉质粘土	1.00~3.50	32.6	18.3	0.914	0.70	14	14.0	0.46	4.32
③	灰色淤泥质粉质粘土	3.20~8.30	40.3	17.5	1.141	1.28	8	17.5	0.62	4.35
④	灰色淤泥质粘土	7.00~17.20	50.3	16.7	1.428	1.25	9	9.5	1.14	2.17
⑤ <sub>1-1</sub>	灰色粘土	14.70~25.00	40.8	17.5	1.166	0.91	12	11.0	0.71	3.26
⑤ <sub>1-2</sub>	灰色粉质粘土	18.80~31.20	34.7	18.0	0.999	0.85	12	14.0	0.44	4.71
⑤ <sub>3-1</sub>	灰色粉质粘土夹粘质粉土	28.00~37.30	33.6	18.1	0.968	0.87	9	16.5	0.38	5.33
⑤ <sub>3-2</sub>	灰色粉质粘土	34.50~47.20	33.5	18.1	0.978	0.78	13	18.0	0.42	4.80
⑤ <sub>4</sub>	灰绿色粉质粘土	39.90~49.00	23.4	19.6	0.680	0.21	38	18.0	0.25	11.82
⑦ <sub>1</sub>	灰黄—灰色砂质粉土	43.50~51.00	25.1	19.1	0.732		4	29.0	0.15	11.82
⑦ <sub>2-1</sub>	草黄色粉砂	45.30~49.60	26.6	19.0	0.763		1	32.0	0.13	13.90
⑦ <sub>2-2</sub>	灰色粉砂	51.00~69.90	27.1	18.9	0.776		1	32.0	0.13	14.61
⑨ <sub>1</sub>	灰色粉砂	66.00~88.90	26.4	19.0	0.761		1	31.0	0.18	11.64

易引发地铁上浮<sup>[18-19]</sup>,亦可能造成工程桩受力变形,甚至断桩<sup>[20-22]</sup>,因而准确地获取开挖范围内软土的变形模量对工程安全至关重要。

## 2 试验方法

本工程应力路径三轴试验采用多功能应力—应变自动控制的应力路径三轴仪,刚性密封式的三轴容器,土样直径为 61.8 mm(面积为 30 cm<sup>2</sup>),土样高度为 120 mm<sup>[23]</sup>。经多方讨论,综合地基土特性、土层对基坑开挖的影响程度、设计要求及试验周期

等方面,确定试验所使用土样取自深基坑范围内 3 个钻孔中不同深度的共 16 筒土样(均为 I 级样),主要为基坑开挖范围内的灰色淤泥质粘土、灰色粘土、灰色粉质粘土及灰绿色粉质粘土。

试验方法:通常三轴试验采用等向固结状态,而天然土层中的初始应力一般处于各向异性的应力状态,即  $K_0$  固结状态,故本次试验在  $K_0$  状态下按土样的自重应力进行连续加荷排水试验<sup>[24-26]</sup>,记录在加荷条件下的竖向应力  $\sigma_1$ 、侧向应力  $\sigma_3$ 、竖向变形

$\Delta h(s)$ ;加荷至自重应力后开始以同样的速率卸荷至零,并记录  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 、 $\Delta h(s)$ ;再以同样的速率再次进行加荷试验,直至以 2 倍的自重应力结束,并作记录。试验过程中以应力应变控制方法向试样施加或卸除竖向应力,应变速率控制在  $8 \times 10^{-5}/\text{min}$ 。

### 3 试验成果分析

本次试验共进行 16 组,以 G7-15 号土样为例,单个土样加荷、卸荷、再加荷过程的试验数据详见表 2、图 1,16 组数据剔除异常值按土层整理后统计结果(平均值)详见图 2~图 5。

表 2 G7-15 号土样试验数据  
Table 2 Test data of No. G7-15 soil sample

试验条件	$\sigma_1/\text{kPa}$	$\sigma_3/\text{kPa}$	$K_0$	$\Delta h_1/\text{mm}$	$\epsilon_1/\%$	$E/\text{MPa}$
加荷	20	11	0.55	0.52	0.43	4.62
	40	22	0.55	1.25	1.04	3.84
	60	31	0.52	1.86	1.55	3.87
	80	40	0.50	2.37	1.98	4.05
	100	50	0.50	2.84	2.37	4.23
	120	59	0.49	3.26	2.72	4.42
	140	67	0.48	3.60	3.00	4.67
	160	75	0.47	3.91	3.26	4.91
	180	85	0.47	4.23	3.53	5.11
200	94	0.47	4.55	3.79	5.27	
卸荷	180	84	0.47	0.02	0.02	115.45
	160	72	0.45	0.04	0.03	115.45
	140	62	0.44	0.07	0.06	98.96
	120	53	0.44	0.12	0.10	76.97
	100	44	0.44	0.17	0.15	67.91
	80	36	0.45	0.25	0.22	55.42
	60	28	0.47	0.37	0.32	43.68
	40	19	0.48	0.52	0.45	35.52
	20	11	0.55	0.76	0.66	27.34
再加荷	40	21	0.53	0.48	0.42	9.62
	80	41	0.51	0.87	0.75	10.62
	120	59	0.49	1.24	1.07	11.17
	160	76	0.48	1.59	1.38	11.62
	200	93	0.47	1.97	1.71	11.72
	240	113	0.47	2.42	2.10	11.45
	280	132	0.47	2.88	2.49	11.22
	320	152	0.48	3.37	2.92	10.96
	360	171	0.48	3.93	3.40	10.58
400	191	0.48	4.67	4.05	9.89	

注:取土深度 26.1~26.4 m。

由图 1 中数据可知,土样的加荷—卸荷—再加荷过程均在  $K_0$  条件下,即  $\sigma_1 = \sigma_3 / K_0$ ,试验过程中同时记录主应力  $\sigma_1$  和围压  $\sigma_3$ ,通过对土样施加应力的调节,控制土样径向应变为零,并获得静止土压力

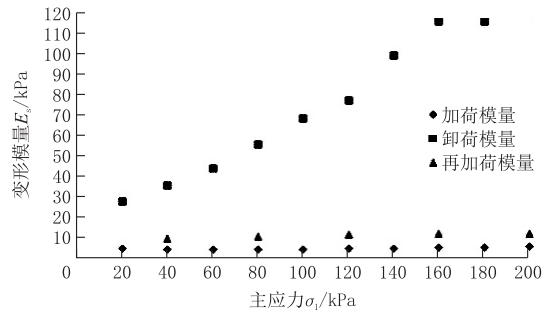


图 1 G7-15 号土样加荷—卸荷—再加荷统计结果  
Fig.1 Statistical results of loading—unloading—re-loading of soil sample No. G7-15

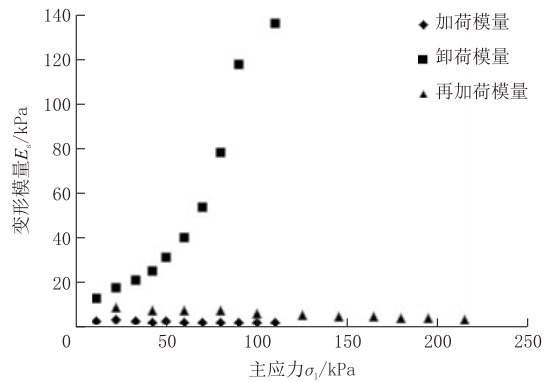


图 2 灰色淤泥质粘土加荷—卸荷—再加荷统计结果  
Fig.2 Statistical results of loading—unloading—re-loading on gray silt clay

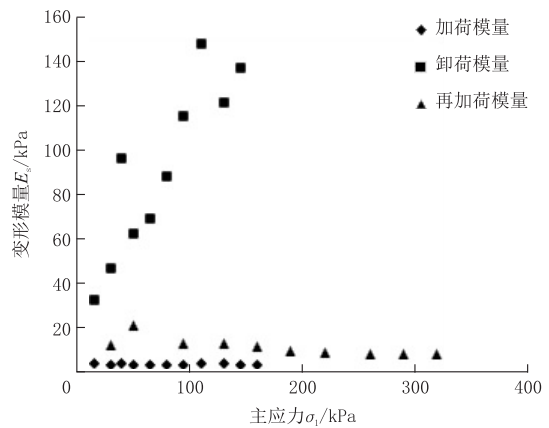


图 3 灰色粘土加荷—卸荷—再加荷统计结果  
Fig.3 Statistical results of loading—unloading—re-loading on grey clay

系数  $K_0$  值,可以看出,  $K_0$  在加荷过程中逐渐减小,而在卸荷回弹过程中逐渐增加。根据土力学基本理论,土的变形模量计算公式为:

$$E_s = \Delta\sigma_z / \Delta\epsilon_z \quad (1)$$

式中:  $\Delta\sigma_z$ ——主应力增量;  $\Delta\epsilon_z$ ——主应力方向应变增量。

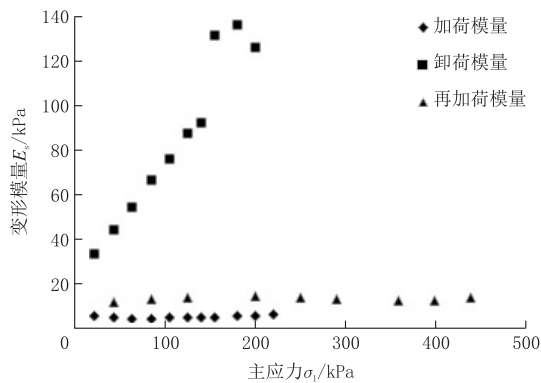


图 4 灰色粉质粘土加荷—卸荷—再加荷统计结果

Fig.4 Statistical results of loading—unloading—re-loading on gray silty clay

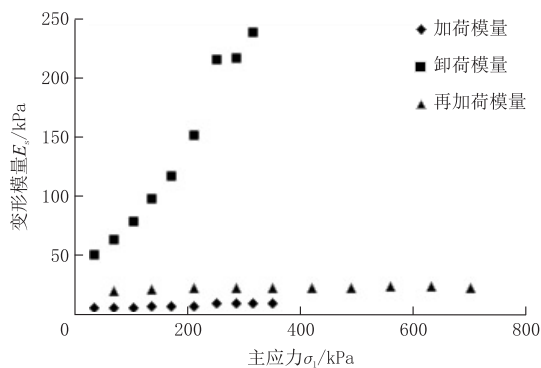


图 5 灰绿色粉质粘土加荷—卸荷—再加荷统计结果

Fig.5 Statistical results of loading—unloading—re-loading on gray-green silty clay

由图 2~图 5 可以看出,土样的卸荷模量在整个实验过程变化尤为显著,土样卸荷模量数值远远大于加荷模量及再加荷模量数值,一般为 10~20 倍,且回弹变形量远远小于加荷时产生的压缩变形量,卸荷曲线亦无法回到原点,这主要是因为土体为弹塑性材料,在主应力的作用下,土体在加荷过程中会产生一部分的塑性变形,如土体颗粒破碎或颗粒排列结构发生变化形成更稳定的结构,此部分变形为不可恢复变形,而回弹量往往为土体的弹性变形、粒间结合水膜变形等,此部分为可恢复变形。

随着主应力增加,土样的加荷模量、再加荷模量大体呈逐渐变大的趋势,当变形模量增大后又呈减小的趋势后,土样可能趋近于破坏状态。这主要是因为 2 次加荷过程中,土样发生排水固结,土体中孔隙体积逐渐减小,同时固体颗粒排列逐渐紧密,强度提高,致使土样越发难以压缩,但相对于灰色粉质粘土和灰绿色粉质粘土而言,灰色淤泥质粘土和灰色粘土变化不显著,可能是因为此 2 层地基土土性

软弱,含水量较高,孔隙比较大,土样在试验过程中发生排水固结的速率较慢,固结效果不明显,强度提高亦有限。进一步对比不难发现,再加荷压缩变形量普遍小于第一次加荷产生的压缩变形量,说明第一次加荷过程中土样完成了部分固结,并且产生了一部分不可恢复变形,压缩性逐渐减小,即表现为再加荷模量亦明显提高。

此外,对于不同深度的粘性土而言,随着深度和自重应力的增加,土体在天然状态下的固结程度逐渐变好,加荷模量、卸荷模量及再加荷模量亦逐渐变大,越来越有利于基坑开挖施工和卸荷回弹的控制,而浅部的淤泥质土及软粘性土由于固结程度较差,压缩性高,开挖过程中产生的变形亦较大,对于沉降控制变形敏感的基坑应加强围护设计及监测,同时还需注意较大的回弹量可能会引发断桩等桩基质量问题。将图 2~图 5 的数据结果和土层常规固结压缩试验比较可知,土样的再加荷变形模量与常规固结试验得到的压缩模量  $E_{s_{0.1-0.2}}$  相比,前者明显大于后者,一般为 3 倍左右,可见软粘性土的变形模量受应力路径的影响较为显著。 $K_0$  应力路径下获得的变形模量应用在基坑工程设计及模拟时,可以较真实地反映基坑开挖过程中土体的实际变形情况,从而有利于为设计人员提供更合理的基坑围护设计方案和相关参数,在确保工程安全的前提下,降低工程造价,避免安全储备过高造成的工程浪费。

#### 4 结论

(1) 软粘性土的变形模量受应力路径的影响较为显著, $K_0$  应力路径下加荷—卸荷—再加荷试验,可以较为真实地反映土体在天然状态下进行基坑开挖过程中的卸荷、再加荷时的工程变形特性。

(2) 土样卸荷模量数值远远大于加荷模量及再加荷模量数值,而回弹变形量远远小于加荷时产生的压缩变形量;土样的加荷模量、再加荷模量大体呈逐渐变大的趋势,相比较而言,灰色淤泥质粘土和灰色粘土数值均较小,变化亦不明显,此 2 层地基土对基坑开挖时的边坡稳定性和桩基均较为不利。

(3) 对于周边环境复杂的深大基坑,真实地反映出土体在天然状态下的变形参数对基坑设计至关重要,而上海地区勘察工程中极少进行  $K_0$  应力路径三轴试验,建议以后在软土地区的深大基坑工程中加强应用。

## 参考文献(References):

- [1] 严学新, 史玉金. 上海市工程地质结构特征[J]. 上海地质, 2006, (4): 19-24.  
YAN Xuexin, SHI Yujin. Structure characteristic of engineering geology in Shanghai[J]. Shanghai Geology, 2006, (4): 19-24.
- [2] 胡其志, 何世秀, 杨雪强. 基坑开挖软土流变特性的试验研究[J]. 湖北工学院学报, 2003, 18(3): 1-3.  
HU Qizhi, HE Shixiu, YANG Xueqiang. Experimental study on rheology property of soft clay in excavation[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2003, 18(3): 1-3.
- [3] 孙德安, 申海娥. 上海软土的流变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 74-78.  
SUN Dean, SHEN Haie. Experimental study on rheology behaviour of Shanghai soft clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 74-78.
- [4] 赖华辉. 淤泥质粘土的流变特性及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
LAI Huahui. Study on rheological property of silt clay and its application [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [5] 黄茂松, 王卫东, 郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 146-161.  
HUANG Maosong, WANG Weidong, ZHENG Gang. A review of recent advances in the underground engineering and deep excavations in soft soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 146-161.
- [6] 徐而进. 上海软土深基坑工程周围管线变形特性实测分析[J]. 建筑施工, 2018, 40(2): 268-271.  
XU Erjin. Actual measurement analysis of pipeline deformation characteristics around Shanghai soft soil deep foundation pit engineering[J]. Building Construction, 2018, 40(2): 268-271.
- [7] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 127-153.  
LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics (Second edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 127-153.
- [8] Lambe TW. Stress path method[M]. J. of Soil Mech. and Found. Div. ASCE, 1967, (6): 268-277.
- [9] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, (6): 22-27.  
LIU Guobin, HOU Xueyuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, (6): 22-27.
- [10] 李光宏. 复杂环境基坑支护方案的综合设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(9): 80-83.  
LI Guanghong. Comprehensive design of foundation pit support scheme in complex environment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(9): 80-83.
- [11] 马晓文, 艾英钵. 基坑开挖土体卸荷特性研究进展[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 189-193.  
MA Xiaowen, AI Yingbo. Review of soil behaviors under excavation unloading of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 189-193.
- [12] 杨同帅, 叶冠林, 顾琳琳. 上海软土小应变三轴试验及本构模拟[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1930-1935.  
YANG Tongshuai, YE Guanlin, GU Linlin. Small-strain triaxial tests and constitutive modeling of Shanghai soft clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1930-1935.
- [13] 盛佳初, 武朝军, 叶冠林, 等. 上海黏土强度特性真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 47-52.  
SHENG Jiaren, WU Chaojun, YE Guanlin, et al. Strength property of Shanghai clay in true triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 47-52.
- [14] 尹骥, 陈宝, 李煜, 等. 上海第②层粉质黏土非饱和强度与变形模量的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1619-1625.  
YIN Ji, CHEN Bao, LI Yu, et al. Triaxial tests on strength and deformation modulus of No.2 layer silty clay of Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1619-1625.
- [15] 翁鑫荣. 软土应力路径特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 825-828.  
WENG Xinrong. Experimental research on characteristics of stress path for soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 825-828.
- [16] 赵登峰. 考虑应力路径的软土深基坑开挖分析及  $m$  值优化研究[D]. 浙江宁波: 宁波大学, 2014.  
ZHAO Dengfeng. Study on stress path of deep foundation pit excavation in soft soil area and the optimization of  $m$ -value [D]. Ningbo Zhejiang: Ningbo University, 2014.
- [17] 邓尧. 海相软土卸荷力学特性研究及其基坑开挖数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
DENG Yao. Study on unloading mechanical characteristics of marine soft soil and numerical simulation of foundation pit excavation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [18] 刘国彬, 贾付波. 基坑回弹时间效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3040-3044.  
LIU Guobin, JIA Fubo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3040-3044.
- [19] 徐闻达. 基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响研究[D]. 浙江杭州: 浙江大学, 2018.  
XU Wenda. Research on the influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent metro tunnel[D]. Hangzhou Zhejiang: Zhejiang University, 2018.
- [20] 郭月亮, 田少坤. 软土地区基坑开挖引起桩基质量问题的判定与处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(6): 59-62.  
GUO Yueliang, TIAN Shaokun. Judgment of quality problems of pile foundation caused by excavation in soft soil region and the treatment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(6): 59-62.