

DOI: 10.11779/CJGE202101021

# 基于多功能 CPTU 测试的基坑开挖扰动深度确定方法

李 赞<sup>1, 2</sup>, 刘松玉<sup>\*1, 2</sup>, 吴 恺<sup>1, 2</sup>, 蔡国军<sup>1, 2</sup>, 童立元<sup>1, 2</sup>, 刘文亮<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 基坑开挖卸荷扰动区深度的确定是基坑设计的重要指标。现有的关于扰动区深度的确定大都采用室内试验方法, 无法反映土体的原位应力状态。基于多功能孔压静力触探(CPTU)原位测试, 对南京、无锡、常州 3 个基坑工程进行开挖前、后的原位测试, 分析了开挖卸荷对锥尖阻力  $q_t$ 、侧壁摩阻力  $f_s$ 、摩阻比  $R_f$ 、电阻率  $\rho$  的影响; 进一步结合室内卸荷回弹试验, 提出了基于原位测试的基坑开挖扰动深度确定方法。结果表明, 对于粉土和粉砂地基, 开挖卸荷会使锥尖阻力和侧壁摩阻力降低, 且随着土体埋深增加, 其影响程度逐渐减小; 对摩阻比和电阻率影响则较小; 基坑开挖扰动区深度为 CPTU 锥尖阻力  $q_t$  衰减 20%时对应的深度距坑底开挖面的距离。

**关键词:** 多功能孔压静力触探; 开挖卸荷; 锥尖阻力; 侧壁摩阻力; 扰动深度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)01-0181-07

作者简介: 李 赞(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事原位测试技术、软土地基处理等方面的研究工作。E-mail: lizan@seu.edu.cn。

## Determination of disturbance depth due to excavation using multifunctional CPTU tests

LI Zan<sup>1, 2</sup>, LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>, WU Kai<sup>1, 2</sup>, CAI Guo-jun<sup>1, 2</sup>, TONG Li-yuan<sup>1, 2</sup>, LIU Wen-liang<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The disturbance depth of excavations is an important parameter for their design. Most of the existing methods for determining the disturbed depth are laboratory tests, which cannot reflect the in-situ stress state of soils. The in-situ multifunctional piezocone penetration tests (CPTU) are carried out before and after the excavation of three projects in Nanjing, Wuxi and Changzhou. The influences of unloading induced by excavation on the cone resistance ( $q_t$ ), sleeve resistance ( $f_s$ ), friction ratio ( $R_f$ ) and resistivity ( $\rho$ ) are also analyzed. Further combining with the laboratory unloading resilience tests, the disturbance depth of excavation based on in-situ tests is proposed. The results show that the unloading effect may reduce the values of cone resistance and sleeve resistance for silt and silty sand foundations, and the corresponding influences on the amplitudes decrease with the increase of depth. However, the excavation has little effect on the friction ratio and resistivity. The disturbance depth of excavation can be determined by the depth beneath the excavation bottom where the cone resistance ( $q_t$ ) is reduced by 20% as compared to that prior to excavation.

**Key words:** multifunctional CPTU; excavation unloading; cone resistance; sleeve resistance; disturbance depth

## 0 引言

基坑开挖会引起土体扰动进而改变土体的工程特性, 土体扰动分析不当会诱发工程安全事故<sup>[1-2]</sup>。现有关于扰动对土体影响的研究主要集中在扰动对土体强度特性和变形特性的影响<sup>[3-10]</sup>。开挖卸荷使坑底土体应力释放, 强度方面, 卸荷扰动使坑内土体的强度降低; 变形方面, 开挖卸荷使坑内土体产生回弹变形。这一变化只局限在坑底一定深度范围内, 此范围之外的土体仍保持开挖前的初始状态。将这一土体工程特性因基坑开挖发生改变的深度称为卸荷影响深度。目

前, 计算开挖卸荷影响深度比较困难, 在工程中一般只需要确定受卸荷影响较大的深度(称为卸荷扰动深度), 即对土体强度和回弹变形影响较大的深度。基坑开挖卸荷扰动深度是直接影响地基基础安全的重要设计指标, 是基坑支护设计的重要依据<sup>[11]</sup>。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0800201); 国家自然科学基金项目(41972269, 51878157); 江苏省交通工程建设局科技项目(CX-2019GC02)

收稿日期: 2020-01-08

\*通信作者(E-mail: liusy@seu.edu.cn)

潘林有等<sup>[12]</sup>提出了利用卸荷比  $R$  (式(1)) 衡量基坑开挖前后坑底应力水平的变化, 通过室内抗剪强度试验, 得到极限卸荷比  $R_u$ , 当  $R=R_u$  时, 卸荷影响深度定义为扰动区深度  $h_u$  (式(2))。室内模拟试验结果表明, 扰动区深度约为开挖深度  $D$  的 56% (模型见图 1), 扰动区内强度折减达 38%以上。

$$R = \frac{P_{\max} - p_i}{P_{\max}} , \quad (1)$$

$$h_u = \frac{(1-R_u)D}{R_u} , \quad (2)$$

式中,  $R_u$  为极限卸荷比,  $p_{\max}$  为初始上覆荷载,  $p_i$  为第  $i$  级卸荷后剩余上覆荷载,  $D$  为开挖深度,  $h_u$  为扰动区深度。

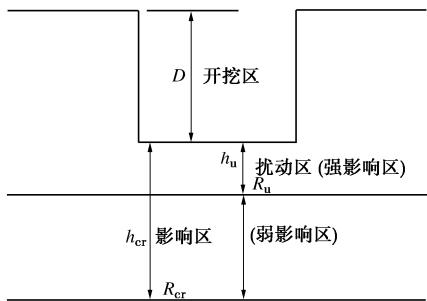


图 1 卸荷影响深度

Fig. 1 Depths affected by unloading

此后, 秦爱芳等<sup>[11]</sup>、张淑朝等<sup>[13]</sup>、邓指军等<sup>[14]</sup>、程玉梅<sup>[15]</sup>、潘林有等<sup>[16]</sup>进行了相关研究, 研究成果见表 1。

表 1 现有开挖扰动区深度确定的室内试验方法

Table 1 Existing laboratory test methods for determination of disturbance depth

文献	试验类型	极限卸荷比 $R_u$	扰动区深度 $h_u$
秦爱芳等 <sup>[11]</sup>		0.67	0.50D
潘林有等 <sup>[12]</sup>	直剪试验	0.64	0.56D
程玉梅 <sup>[15]</sup>		0.66	0.52D
秦爱芳等 <sup>[11]</sup>		0.80	0.25D
张淑朝等 <sup>[13]</sup>		0.90	0.11D
邓指军等 <sup>[14]</sup>	卸荷回弹试验	0.81	0.23D
潘林有等 <sup>[16]</sup>		0.67	0.25D

以上关于开挖卸荷扰动区深度的确定, 大都通过室内抗剪强度试验和卸荷回弹试验确定, 秦爱芳等<sup>[11]</sup>指出, 两种分析方法的差异是由室内试验的局限性导致的。同时, 钻孔取样、室内试验不可避免地会对土体造成扰动, 无法反映土体的原位应力状态<sup>[17-18]</sup>。

现代多功能 CPTU 原位测试已广泛应用于评价土体的工程特性, 相较于传统的室内试验, 具有快捷、经济、连续性、高精度等优点<sup>[19]</sup>。原位测试数据能较

好地反映基坑开挖前后坑底土体工程特性的变化, 进而可用于确定开挖卸荷引起的土体扰动程度和深度。陈云敏等<sup>[20]</sup>对杭州地铁湘湖车站基坑坍塌后坑内扰动土和坑外原状土进行了 CPT 静力触探测试, 锥尖阻力的现场测试结果表明, 坑内上部 2 m 深度范围内土层受坍塌扰动最大, 扰动度接近 80%, 随深度增加扰动程度逐渐减小, 地连墙墙底土体的扰动度约为 40%。

基于以上背景, 本文通过对长三角地区南京、无锡、常州 3 个典型的场地进行基坑开挖前、后的 CPTU 试验, 分析了基坑开挖卸荷对 CPTU 测试参数的影响规律; 与室内卸荷回弹试验对比分析, 提出了基于多功能 CPTU 原位测试的基坑开挖卸荷扰动深度确定方法。

## 1 试验场地描述

采用东南大学引进的现代多功能 CPTU 测试系统, 对长三角城市南京、无锡和常州的典型基坑开挖工程进行了开挖前、后的坑外和坑内原位测试, 基坑开挖前通过 GPS 定位测试点坐标, 基坑开挖后根据现场施工情况选取合适的测试点, 确保与开挖前测试点平面位置接近。通过室内土工试验, 各场地土层的基本物理力学性质指标见表 2。

南京试验场地位于南京河西南鱼嘴金融聚集区 H 地块, 属长江漫滩地貌单元, 地形平整开阔。场地开挖影响深度范围内的土层主要为第四纪淤泥质粉质黏土及分布于其中的粉砂夹层。淤泥质粉质黏土层压缩性大, 含水率高, 强度低; 粉砂层为轻微液化土层。基坑平面尺寸为 30 m×50 m。

无锡试验场地位于苏锡常南部高速公路太湖隧道标段 K24+500 处, 地处太湖湖荡平原区, 地貌属长三角太湖堆积平原区。地表土层主要为第四纪全新世黏土及上更新世黏土、粉土层。具有高含水率, 高压缩性和低强度等特征。基坑平面尺寸为 50 m×185 m。

常州试验场地位于常州市轨道交通 2 号线怀德桥站, 地貌属长三角冲积高亢平原, 地势平坦。地面以下浅部广泛分布第四纪晚更新世黏土及粉土、粉砂。场地黏性土含水率高、压缩性高、强度中等; 粉(砂)性土含水率高, 具有中等压缩性, 局部夹少量的粉砂和黏性土, 土质不均匀。基坑平面尺寸为 25 m×240 m。

## 2 室内卸荷回弹试验

### 2.1 试验结果

由表 2 可知, 因同属长三角冲积平原, 常州地区粉土层和粉砂层的重度、含水率和孔隙比等基本物理力学参数与南京的粉砂层和无锡的粉土层非常接近。

表 2 场地主要土层的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of soils

场地名称	土层	层厚/m	$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma' /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$G_s$	w/%	$e_0$
南京	淤泥质粉质黏土	2.4	17.8	8.07	2.68	38.3	1.081
	粉砂	4.6	19.1	9.58	2.65	25.0	0.723
无锡	粉质黏土	5.0	19.5	9.45	2.71	30.3	0.810
	粉土	6.4	19.4	9.64	2.71	27.1	0.774
常州	素填土	2.3	19.1	9.26	2.75	31.4	0.890
	淤泥质粉质黏土	3.6	18.6	8.51	2.72	38.1	1.020
	⑤ <sub>1</sub> 粉土	4.7	19.4	9.48	2.70	29.0	0.794
	粉砂	4.4	19.7	9.80	2.69	26.0	0.724
	⑤ <sub>3</sub> 粉土	10.0	19.0	9.14	2.71	31.0	0.870

注: 表中,  $\gamma$  为天然土层的重度,  $\gamma'$  为浮重度,  $G_s$  为土粒相对质量密度,  $w$  为含水率,  $e_0$  为原状土孔隙比。

针对南京场地基坑开挖面以下的粉砂层和无锡场  
地基坑开挖面以下的粉土层进行室内卸荷回弹试验。  
为了取得充分的卸荷回弹试验数据, 每组土样的预压  
荷载分别为 100, 200, 300, 400, 500 kPa。在进行回  
弹试验时, 对各土样在每级卸荷下的回弹变形进行了  
记录, 采用式(3) 和式(4) 分析卸荷比  $R$  与回弹比  
率  $r$ 、卸荷比  $R$  与回弹模量对数  $\lg E_{ur}$  之间的关系<sup>[21]</sup>,  
计算结果见图 2, 3。

$$r = \frac{e_i - e_0}{e_{\max} - e_0}, \quad (3)$$

$$E_{ur} = \frac{p_{\max} - p_i}{e_i - e_0} (1 + e_0), \quad (4)$$

式中,  $r$  为回弹比率,  $e_i$  为第  $i$  级卸荷后回弹变形稳定  
时的孔隙比,  $e_0$  为初始孔隙比,  $e_{\max}$  为荷载全部卸除  
后回弹变形稳定时的孔隙比;  $E_{ur}$  为回弹模量,  $p_{\max}$  为  
最大上覆压力,  $p_i$  为第  $i$  级卸荷后上覆压力。

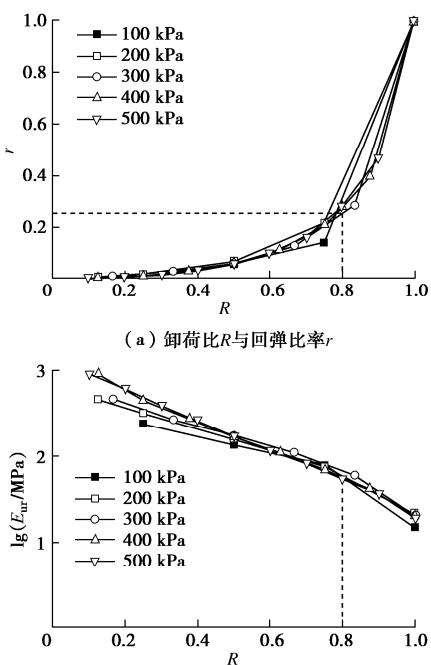


图 2 粉砂 (南京场地) 卸荷回弹试验结果

Fig. 2 Results of unloading rebound tests on silty sand at Nanjing

site

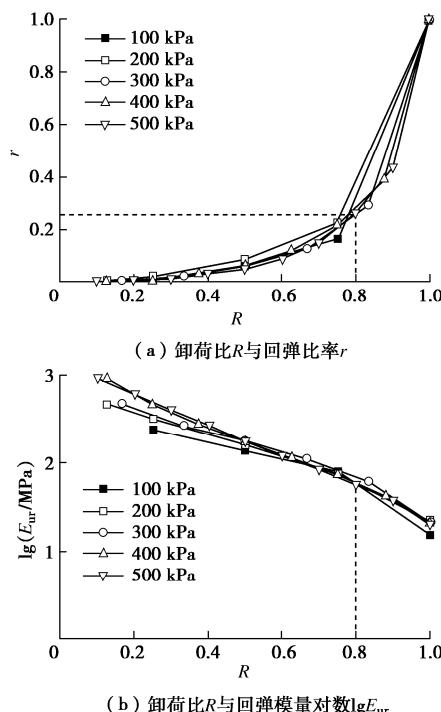


图 3 粉土 (无锡场地) 卸荷回弹试验结果

Fig. 3 Results of unloading rebound tests on silty sand at Wuxi site

## 2.2 开挖卸荷扰动深度的确定

对于均质地基, 不考虑分层开挖的影响, 坑底中心点以下任一深度  $h$  处的卸荷比  $R^{[16]}$ :

$$R = \frac{\alpha D}{D+h}, \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为附加应力系数 (对于大面积卸荷工况, 强影响深度范围内, 取  $\alpha = 1$ ),  $D$  为开挖深度。

由图 2, 3 可知, 对于粉砂和粉土, 二者卸荷回弹试验得到的回弹规律基本一致, 当  $R > 0.8$  时, 回弹量达到全部回弹量的 80% 左右, 回弹模量  $E_{ur}$  发生明显变化, 这一卸荷比  $R$  即为极限卸荷比  $R_u$ , 对应的卸荷影响深度  $h$  为扰动区深度  $h_u$ , 取  $\alpha = 1$ , 可以看出, 此时式(5)与式(2)等价。对于某一开挖深度  $D$ , 将  $R_u = 0.8$  代入式(5)计算得到卸荷扰动区深度  $h_u$  约为  $0.25D$ 。

### 3 CPTU 原位测试

#### 3.1 试验结果

现场CPTU测试简况如图4所示。南京、无锡和常州3个典型基坑场地的原位测试结果和土层剖面划分如图5~7所示,测试期间的地下水位在图中进行了标注,锥尖阻力均为孔压修正后的锥尖阻力。此外,为分析基坑开挖卸荷对土体电阻率的影响,在南京和无锡场地进行了电阻率同步测试。



图4 CPTU 现场测试

Fig. 4 In-situ piezocone penetration tests

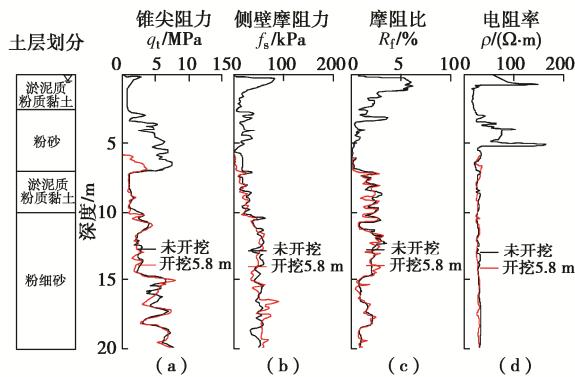


图5 南京场地电阻率 CPTU 测试结果

Fig. 5 Results of piezocone penetration tests on resistivity at Nanjing site

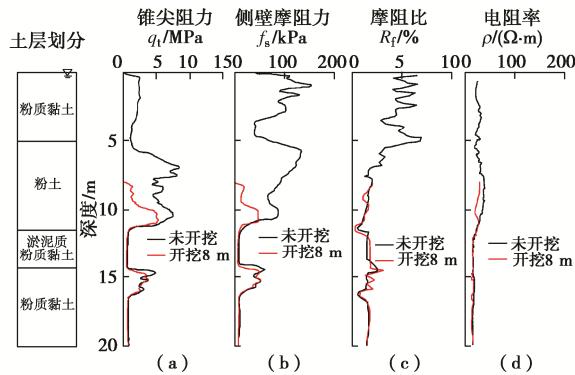


图6 无锡场地电阻率 CPTU 测试结果

Fig. 6 Results of piezocone penetration tests on resistivity at Wuxi site

#### 3.2 开挖卸荷对锥尖阻力和侧壁摩阻力的影响

图5~7的锥尖阻力和侧壁摩阻力测试结果表明,

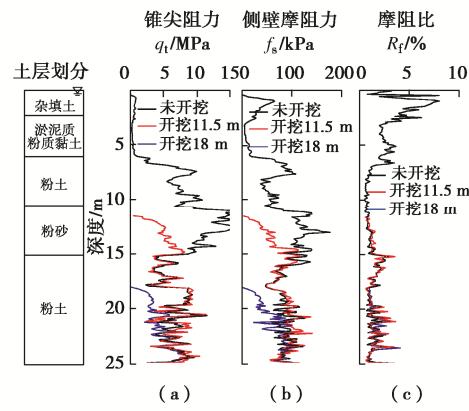


图7 常州场地 CPT 测试结果

Fig. 7 Results of cone penetration tests at Changzhou site

开挖卸荷对锥尖阻力和侧壁摩阻力的影响规律基本一致,本文着重分析其一。文献[19]指出,锥尖阻力的测试精度高于侧壁摩阻力,因此,采用式(6)对3个测试场地的锥尖阻力衰减规律进行了定量分析<sup>[20]</sup>,计算结果如图8~10所示。

$$S_D = \frac{q_{t1} - q_{t2}}{q_{t1}} \times 100 \quad (6)$$

式中,  $S_D$  为锥尖阻力衰减率(百分数),  $q_{t1}$  为未开挖时坑外测试的锥尖阻力,  $q_{t2}$  为开挖后坑内测试的锥尖阻力。

图8~10的计算结果表明,开挖卸荷会使土体应力释放、强度降低,引起锥尖阻力减小,同一土层内,随深度增加衰减幅度逐渐减小。存在某一临界深度  $h$ ,当深度超过这一深度时,锥尖阻力衰减出现折点;在此深度之上,锥尖阻力衰减明显,在此深度之下,锥尖阻力衰减小于20%,可视为开挖卸荷影响较小。对于南京场地,基坑开挖5.8 m,临界深度  $h$  为7 m;对于无锡场地,基坑开挖8 m,临界深度  $h$  为10.7 m;对于常州场地,基坑开挖11.5 m时,临界深度  $h$  为14.5 m;基坑开挖18 m时,临界深度  $h$  为22 m。

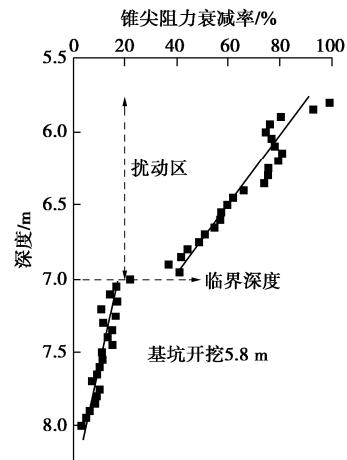


图8 南京场地锥尖阻力衰减

Fig. 8 Decrease of cone resistance at Nanjing site

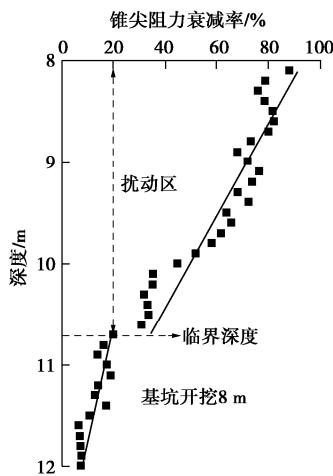


图 9 无锡场地锥尖阻力衰减

Fig. 9 Decrease of cone resistance at Wuxi site

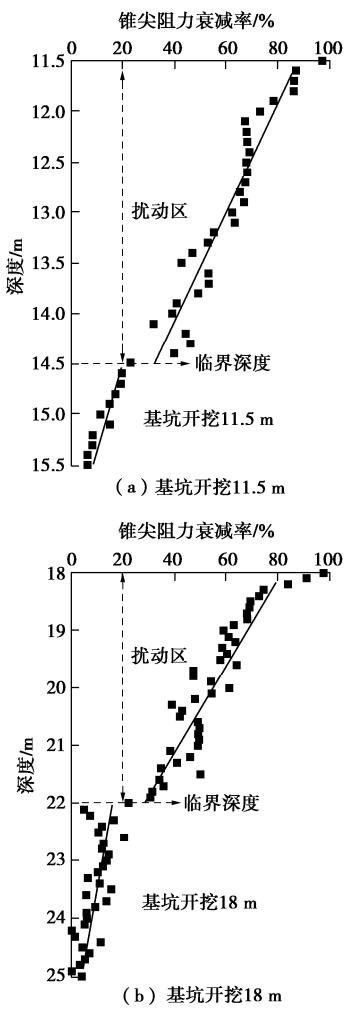


图 10 常州场地锥尖阻力衰减

Fig. 10 Decrease of cone resistance at Changzhou site

### 3.3 开挖卸荷对摩阻比和电阻率的影响

图 5~7 的试验结果表明, 开挖卸荷对摩阻比的影响较小。这是因为, 摩阻比为任一深度的侧壁摩阻力与锥尖阻力的比值, 而 3.2 节的分析表明, 开挖卸

荷对锥尖阻力和侧壁摩阻力的影响规律基本一致。同时, 图 5~7 的电阻率测试结果表明, 开挖卸荷对电阻率影响较小。这是因为土体电阻率主要受含水率、离子浓度、饱和度、温度等因素影响<sup>[22-23]</sup>, 而开挖卸荷主要影响土体的原位应力状态, 对土体含水率、离子浓度、饱和度、温度等因素影响较小。

综合以上分析可知, 开挖卸荷使坑内土体扰动, 引起坑底土体锥尖阻力和侧壁摩阻力衰减, 坑底土体的物理力学参数发生变化。针对开挖后的工况, 基于多功能 CPTU 原位测试的锥尖阻力和侧壁摩阻力能较好的反应卸荷状态下土体的物理力学性质的变化, 为基坑工程岩土设计参数的优化提供了新的途径, 对基坑等卸荷类工程的设计和施工具有一定的指导意义。

### 3.4 开挖卸荷扰动深度的确定

由图 8~10 可知, 对于 3 个基坑测试场地, 锥尖阻力的衰减规律基本一致。在临界深度以上, 土体锥尖阻力衰减大于 20%, 为强影响区; 临界深度以下锥尖阻力衰减小于 20%, 为弱影响区。结合潘林有等<sup>[12]</sup>提出的扰动区深度概念, 将临界深度以上的强影响区定义为扰动区, 即 CPTU 锥尖阻力衰减为 20% 处的深度距坑底开挖面的距离为扰动区范围。由图 8~10 可知, 对于南京场地, 扰动区深度  $h_u$  为 1.2 m; 对于无锡场地, 扰动区深度  $h_u$  为 2.7 m; 对于常州场地, 基坑开挖 11.5 m 时, 扰动区深度  $h_u$  为 3 m, 基坑开挖 18.0 m 时, 扰动区深度  $h_u$  为 4 m。显然, 扰动区深度与开挖深度呈正比。

文献[12]指出, 卸荷比  $R$  是衡量基坑开挖前后坑底应力水平变化的重要指标, 极限卸荷比  $R_u$  对应的深度为扰动区深度  $h_u$ 。因此, 为了验证基于 CPTU 原位测试基坑开挖扰动深度确定方法的适用性, 对比分析室内试验与原位测试的极限卸荷比。

对于原位测试场地的成层地基, 不考虑分层开挖的影响, 参考式 (6), 坑底中心点以下任一深度  $h$  处的卸荷比可用式 (7), (8) 表示, 将 3 个测试场地的扰动区深度  $h_u$  代入式 (7), (8), 计算得到极限卸荷比  $R_u$ 。

$$R = \frac{\alpha \sum_{i=1}^n \gamma_i' h_i}{\sum_{i=1}^k \gamma_i' h_i} , \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n h_i = D , \\ \sum_{i=1}^k h_i = D + h . \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为附加应力系数 (对于大面积卸荷工况, 强影响深度范围内, 取  $\alpha = 1$ );  $D$  为开挖深度;  $h$  为坑

底中心点以下任一深度;  $\gamma'_i$  为第  $i$  层土体的有效重度;  $h_i$  为第  $i$  层土体的厚度。

原位试验得到的扰动区深度与开挖深度的比值  $h_u/D$  和极限卸荷比  $R_u$  与 2.2 节室内试验得到的  $h_u/D$  和  $R_u$  计算结果对比见表 3。

表 3 室内试验与原位测试的结果对比

Table 3 Comparison of results between laboratory and in-situ tests

场地名称	土层	$D/m$	$h_u/D$		$R_u$	
			原位	室内	原位	室内
南京	粉砂	5.8	0.21	0.25	0.83	0.80
无锡	粉土	8.0	0.34	0.25	0.76	0.80
常州	⑤ <sub>3</sub> 粉土	11.5	0.26	—	0.79	—
		18.0	0.22	—	0.82	—

由表 3 可知, 基于原位测试参数锥尖阻力 ( $q_t$ ) 衰减规律得到的扰动区深度与开挖深度的比值  $h_u/D$  和极限卸荷比  $R_u$  与室内卸荷回弹试验得到的结果基本一致, 表明了原位测试方法确定扰动区深度的适用性。同时, 计算结果的差异是由于原位测试参数反映了天然成层地基的不同基坑开挖方式和支护方式的土体原位应力状态, 而室内试验是在理想均质土体条件下进行的, 无法反映现场实际工况。对于不同形状、尺寸、开挖方式的基坑, 原位测试具有直观、精确、连续性等特点, 因此, 运用原位测试的方法分析开挖扰动区深度具有重要的工程意义。

## 4 结 论

本文通过对长三角城市群中南京、无锡、常州地区典型基坑工程在开挖前、后的 CPTU 试验, 以及现场粉土和粉砂的室内卸荷回弹试验, 得到以下 3 点结论。

(1) 开挖卸荷会使粉土和粉砂的锥尖阻力  $q_t$ 、侧壁摩阻力  $f_s$  减小, 同一土层内, 随深度增加衰减幅度逐渐减小。开挖卸荷对粉土和粉砂的摩阻比  $R_f$ 、电阻率  $\rho$  影响较小。基于多功能 CPTU 原位测试的锥尖阻力和侧壁摩阻力能较好地反映卸荷状态下土体的物理力学性质的变化。

(2) 与室内试验相比, 原位测试参数反映了非均质成层地基不同开挖方式和支护方式下坑内土体的应力变化, 更为符合工程实际。

(3) 提出了一种基于原位测试参数的基坑开挖扰动区深度预测方法, 开挖卸荷扰动区深度可用基坑开挖后锥尖阻力  $q_t$  衰减 20% 处的深度距坑底开挖面的距离确定。

## 参考文献:

[1] 孙 钧, 周 健, 龚晓南, 等. 受施工扰动影响土体环境稳定理论与变形控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004,

32(10): 1261 - 1269. (SUN Jun, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Theory of soil environment stability and deformation control under influence of construction disturbance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2004, 32(10): 1261 - 1269. (in Chinese))

- [2] 孙 钧. 城市环境土工学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005. (SUN Jun. Geoenvironmental Engineering[M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [3] ROCHELLE P L, SARRAILH J , TAVENAS F , et al. Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(1): 52 - 66.
- [4] SANTAGATA M C , GERMAINE J T . Sampling disturbance effects in normally consolidated clays[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2002, 128(12): 997 - 1006.
- [5] HONG Z S, HAN J . Evaluation of sample quality of sensitive clay using intrinsic compression concept[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2007, 133(1): 83 - 90.
- [6] CARROLL R, LONG M . Sample disturbance effects in silt[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2017, 143(9):04017061.
- [7] 李忠超. 软黏土中轨道交通地下深开挖工程变形及稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (LI Zhong-chao. Deformation and Stability Investigation of Underground Excavation of Subway Transit System in Soft Clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [8] 徐永福, 陈建山, 傅德明. 盾构掘进对周围土体力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1174 - 1179. (XU Yong-fu, CHEN Jian-shan, FU De-ming. Effect of shield tunneling on mechanical properties of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1174 - 1179. (in Chinese))
- [9] 邓永锋, 刘松玉, 季署月. 取样扰动对固结系数的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 28 (12): 2687 - 2690. (DENG Yong-feng, LIU Song-yu, JI Shu-yue. Effect of sample disturbance on consolidation coefficient[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2687 - 2690. (in Chinese))
- [10] MENG F Y, CHEN R P, KANG X. Effects of tunneling-induced soil disturbance on the post-construction settlement in structured soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 53-63.

- TERZAGHI, K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1943.
- [11] 秦爱芳, 胡中雄, 彭世娟. 上海软土地区受卸荷影响的基坑工程被动区土体加固深度研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 935 - 940. (QIN Ai-fang, HU Zhong-xiong, PENG Shi-juan. Depth of soil stabilization in passive area of foundation pits for Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 935 - 940. (in Chinese))
- [12] 潘林有, 程玉梅, 胡中雄. 卸荷状态下黏性土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 490 - 493. (PAN Lin-you, CHENG Yu-mei, HU Zhong-xiong. Experimental study on the shear strength of clay under the unloading state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 490 - 493. (in Chinese))
- [13] 张淑朝, 张建新, 张 阳, 等. 基坑开挖卸荷土体回弹实验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 426 - 429. (ZHANG Shu-chao, ZHANG Jian-xin, ZHANG Yang, et al. Experimental study on rebound of clay due to foundation excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 426 - 429. (in Chinese))
- [14] 邓指军, 贾 坚. 地铁车站深基坑卸荷回弹影响深度的试验[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(3): 52 - 55. (DENG Zhi-jun, JIA Jian. On unloading resilience depth in deep station foundation pit[J]. Urban Mass Transit, 2008, 11(3): 52 - 55. (in Chinese))
- [15] 程玉梅. 基坑开挖卸荷影响深度的确定[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5): 36 - 38. (Determination of the influence depth due to excavation unloading[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(5): 36 - 38. (in Chinese))
- [16] 潘林有, 胡中雄. 深基坑卸荷回弹问题的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 101 - 104. (PAN Lin-you, HU Zhong-xiong. Experimental study on the resilience of pit under unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 101 - 104. (in Chinese))
- [17] 沈珠江. 原状取土还是原位测试——土质参数测试技术发展方向刍议[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 90 - 91. (SHEN Zhu-jiang. Soil sampling on site or in-situ testing—A preliminary research on development of soil parameters testing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 90 - 91. (in Chinese))
- [18] BUDHU M , WU C S . Numerical analysis of sampling disturbances in clay soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(7):467 - 492.
- [19] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun, TONG Li-yuan. Research and engineering application of the digital multifunction piezocone penetration test system (CPTU)[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [20] 陈云敏, 胡 琦, 陈仁朋. 杭州地铁湘湖车站基坑坍塌引起的基底土深层扰动与沉降分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 110 - 117. (CHEN Yun-min, HU Qi, CHEN Ren-peng. Soil disturbance by the collapse of retaining wall for a pit excavation and the induced additional settlement: a case study of Hangzhou Metro Xianghu Station[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 110 - 117. (in Chinese))
- [21] 李建民. 超深超大基坑回弹变形计算方法的试验研究[D]. 北京:中国建筑科学研究院, 2010. (LI Jian-min. Research on the Calculation Method of Resilient Deformation in Ultra-Deep Foundation Pit[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2010. (in Chinese))
- [22] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83 - 87. (LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 26(1): 83 - 87. (in Chinese))
- [23] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 温度对污染土电阻率影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1151 - 1155. (HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1151 - 1155. (in Chinese))