

文章编号:1673-9469(2008)03-0019-04

土体卸荷回弹实验研究

张淑朝,张建新,任杰东,张阳

(天津城市建设学院 天津市软土特性与工程环境重点实验室,天津 300384)

摘要:通过大量室内固结回弹实验,研究了天津市土样在卸荷作用下的变形特性。在分析了回弹率和卸荷比以及回弹模量和卸荷比的关系后,确定土样卸荷产生回弹的临界卸荷比 $R = 0.2$ 以及产生强回弹的卸荷比 $R = 0.9$ 。从而可以估算卸荷最大影响区及强回弹区的深度范围,对基坑等卸荷类工程的设计和施工具有一定的指导意义。

关键词:基坑;回弹;卸荷比;回弹模量

中图分类号: TU41

文献标识码: A

Experimental study on the rebound of clay under unloading

ZHANG Shu-chao, ZHANG Jian-xin, REN Jie-dong, ZHANG Yang

(Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment,
Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: Deformation characteristics of soil samples in Tianjin city under unloading are studied through a large number of indoor consolidation-rebound tests. The critical unloading ratio $R = 0.2$ where rebound happened and the unloading ratio $R = 0.9$ where strong rebound happened are confirmed after analyzing the relationships of rebound ratio-unloading ratio and rebound modulus-unloading ratio. These two ratios can be used to estimate the depth of unloading influence area and strong rebound area. Therefore, the study in this paper can provide some guidance to design and construction in such unloading projects as foundation pit.

Key words: foundation pit; rebound; unloading ratio; rebound modulus

随着城市建设的快速发展和建筑技术的不断进步,人们对地下空间的开发和利用日益增多,高层建筑、地铁车站、地下商场和地下停车场等的基坑工程的数量和规模也越来越大,同时基坑工程中也出现了一些亟待解决的问题^[1]。实际上基坑开挖是一个卸荷过程,上部土体的挖出、自重应力的释放,势必引起基坑底部土体的膨胀变形,从而产生基底回弹^[2-5],回弹量的大小是判断基坑稳定性和将来建筑物沉降的重要因素之一,因此研究基坑回弹并计算回弹量是保证基坑稳定、减少沉降危害的有效手段之一。

本文以大面积基坑开挖下的土体为研究对象,进行了一系列室内卸荷回弹实验,得到了研究土体的回弹变形参数和基坑回弹变形规律,为本地区实际基坑工程的设计和施工积累了资料。

1 卸荷回弹实验情况

1.1 实验设计

实验土样取自天津市某工程,现场原状取土深度分别为 5m、10m、15m、20m,均为粉质粘土,土样的物理指标如表 1 所示。按土工试验方法标准^[6]制备试样,采用多联固结仪进行固结回弹实验。首先对每个深度取一组试样分级加荷至最终荷载,每级加荷 24h 后读数作为稳定值,然后将每组试样按相同卸荷比进行卸荷,每级卸荷 24h 后读数作为稳定值,直至荷载为零。其次对每个深度取两组试样分级加荷至最终荷载,每级加荷 24h 后读数作为稳定值;然后将两组试样按不同卸荷比进行卸荷至荷载为零,每级卸荷 24h 后读数作

为稳定值,直至荷载为零。

表 1 土样的物理性质指标

Tab.1 Physical properties of soil samples

取样深度 (m)	含水率 (%)	天然密度 (g/cm ³)	比重	液限 (%)	塑限 (%)	分类
5	27.8	1.95	2.71	30.9	19.5	粉质粘土
10	34.5	1.87	2.71	31.4	19.8	粉质粘土
15	20.5	2.07	2.71	25.1	14.4	粉质粘土
20	28.4	1.95	2.72	33.5	20.1	粉质粘土

1.2 实验结果

本文进行了 4 个不同深度,共 12 组卸荷回弹

实验,得到了图 1 各层土样压缩回弹 e-p 曲线和图 2 不同卸荷比下的回弹曲线。

2 实验成果分析

为了分析土样在卸荷条件下回弹变形的规律,特别定义以下概念:

卸荷比 R

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

式中 P_{max} - 最大预压荷载或初始上覆荷载; P_i - 卸荷后上覆荷载。

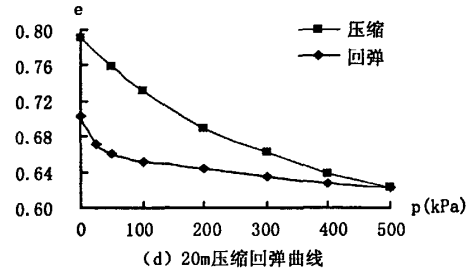
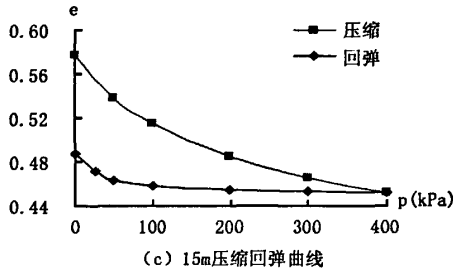
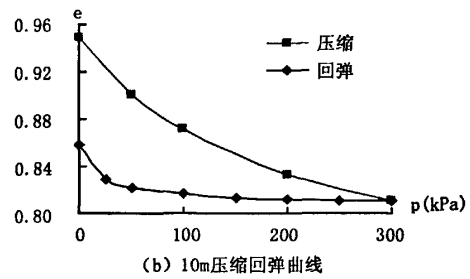
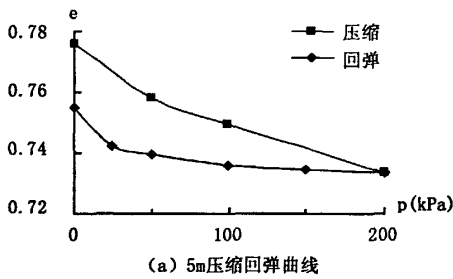


图 1 各层土样压缩回弹 e-p 曲线

Fig.1 Compression-rebound e-p curve of different layers of soil

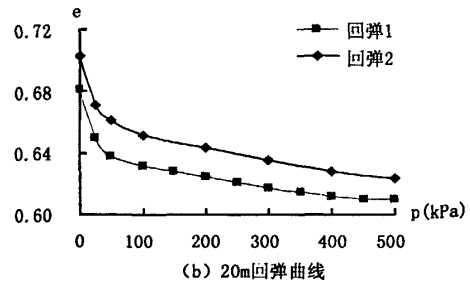
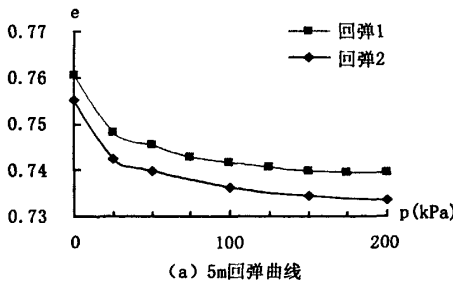


图 2 不同卸荷比下的回弹 e-p 曲线

Fig.2 Rebound e-p curves of different unloading ratios

表 2 实验成果汇总表
Tab.2 Collection of experimental results

5m(100kPa)			10m(200kPa)			15m(300kPa)			20m(400kPa)		
R	λ	Er	R	λ	Er	R	λ	Er	R	λ	Er
1.00	0.028	1.653E+04	1.00	0.059	1.142E+04	1.00	0.079	1.633E+04	1.00	0.118	1.122E+04
0.88	0.012	3.571E+04	0.92	0.023	2.661E+04	0.94	0.043	2.795E+04	0.95	0.066	1.902E+04
0.75	0.008	4.385E+04	0.83	0.014	3.903E+04	0.88	0.023	4.844E+04	0.90	0.047	2.544E+04
0.63	0.005	6.443E+04	0.67	0.008	5.629E+04	0.75	0.014	6.818E+04	0.80	0.036	2.911E+04
0.50	0.003	8.162E+04	0.50	0.003	1.072E+05	0.50	0.006	1.151E+05	0.70	0.030	3.084E+04
0.38	0.002	1.049E+05	0.33	0.002	1.327E+05	0.25	0.002	1.674E+05	0.60	0.025	3.229E+04
0.25	0.000	2.448E+05	0.17	0.000	3.096E+05	0.00	0.000		0.50	0.018	3.624E+04
0.13	0.000		0.00	0.000					0.40	0.012	4.230E+04
0.00	0.000								0.30	0.007	5.503E+04
									0.20	0.003	9.987E+04
									0.10	0.001	1.798E+05
									0.00	0.00	

回弹率 λ

$$\lambda = \frac{e_i - e_{min}}{e_{min}} \quad (2)$$

式中 e_{min} - 最大预压荷载或初始上覆荷载下的孔隙比; e_i - 对应于卸荷后上覆荷载下的孔隙比。

回弹模量 E_r 表示卸荷应力与回弹应变之比,即

$$E_r = \frac{P_{max} - P_i}{e_i - e_{min}} (1 + e_i) = \frac{P_{max} - P_i}{n_0 \lambda} \quad (3)$$

式中 n_0 - 原位初始荷载下土体的孔隙率, $n_0 =$

$$\frac{e_{min}}{1 + e_{min}}$$

根据上述指标定义,将实验结果重新整理,见表 2。

2.1 回弹曲线特征

实验中发现当卸荷量较小时,回弹变形很小或不发生回弹变形,若预压荷载很大的话,次固结的量甚至大于回弹量,因此第一次卸荷量要达到一定的值方有回弹变形。如图 1 和图 2 所示,无论是在相同卸荷比下实验还是不同卸荷比下实验均可发现只有当累计卸荷量(卸荷水平)达到一定数量时,才有较大的回弹变形发生。

2.2 λ_{max} 与土层深度的关系

最大回弹率为各土层试样回弹率中的最大值,从表 2 可以看出,土层越深(预压荷载越大),完全卸荷后土的回弹率也越大。这一规律表明,基坑开挖深度越大,坑底土的回弹量也越大,在实际工程中也具有相同的现象。

2.3 回弹率 λ 与卸荷比 R 的关系

图 3 为不同深度土样卸荷比与回弹率关系折线图,可见当卸荷比 R 小于 0.2 时,初始预压荷载小的浅层土样,回弹率 $\lambda \approx 0$,而初始预压荷载比较大的深层土样,还有微少的回弹量,如果把这部分回弹微量也忽略的话,则可以把卸荷比 $R = 0.2$ 视作回弹变形的临界条件,也就是说卸荷比小于 0.2 的土体不发生回弹变形。因此在实际工程中,可以用 $R = 0.2$ 来预估回弹的深度。

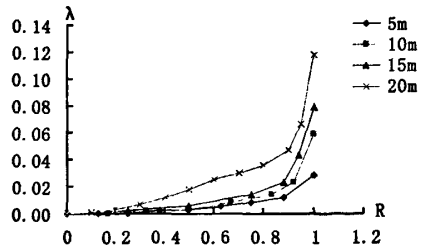


图 3 R-λ 关系
Fig.3 R-λ relation curve

2.4 Er 与卸荷比 R 之间的关系

图 4 是回弹模量 E_r 与卸荷比 R 在半对数坐标上的关系,从图中可以看出,两者关系是一条折线,当 R 在 0.9 左右, E_r 出现拐点,当 $R > 0.9$ 时, E_r 迅速减少,当 $R < 0.9$ 时, E_r 随 R 的减少而近似直线增大。因此,可以把转折点 $R = 0.9$ 看作强回弹区的下边界。在实际工程中,可以用 $R = 0.9$ 来预估强回弹区的深度。

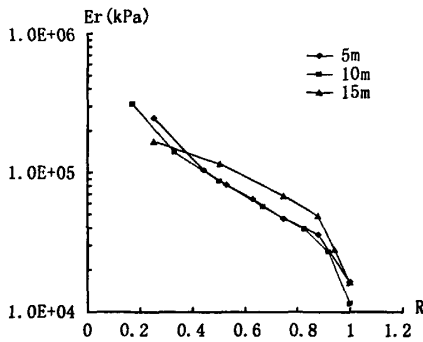


图4 Er-R关系
Fig.4 Er-R relation curves

3 回弹影响区深度的估算

如图5所示,假设基坑宽 B 为50m,长 L 为100m,开挖深度为 D 。

当基坑开挖到坑底时,相对于坑底以下某厚度 Z_{max} 的土层,开挖土体引起的卸荷比 $R < 0.2$,回弹率 $\lambda \approx 0$,由此可以估算坑底最大回弹影响区厚度;而相对于坑底以下某厚度 Z_k 的土层,开挖土体引起的卸荷比 $R > 0.9$,回弹模量迅速减小,回弹率快速增加,因此可以将这部分土层作为强回弹区考虑。

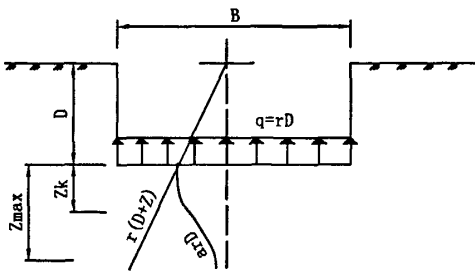


图5 基坑回弹估算举例

Fig.5 An example of rebounding compute of foundation pit

根据公式(4)计算不同开挖深度的回弹影响区厚度估算值见表3。

$$R = \frac{\alpha \gamma D}{\gamma(D + Z)} \quad (4)$$

式中 α - 矩形面积上均布荷载作用下,基坑中心点下竖向附加应力系数,可查附加应力系数表得到。对于强回弹区,因为位于坑底下较浅处,可以近似取 $\alpha \approx 1$ 。

表3 不同开挖深度回弹影响区厚度估算值表
Tab.3 Estimate depth of rebounding influence area under different excavation depth

基坑深度 D(m)	最大影响区 厚度 Z_{max} (m)	强回弹区厚度 Z_k (m)
5	18	0.6
10	29	1.1
15	35	1.7
20	40	2.2

4 结论

土体卸荷回弹变形存在一个临界卸荷比,当卸荷比小于临界卸荷比时,不发生回弹变形;土层越深(预压荷载越大),临界卸荷比越小,根据统计结果,且为了方便计算最大回弹影响区厚度起见,本次实验将天津市区土体的临界卸荷比定为0.2;当卸荷比超过0.9后,回弹模量急剧降低,回弹率快速增加,土体回弹变形存在一个强回弹区,根据试验结果,可以初步将 $R = 0.9$ 作为天津市区土体强回弹区下边界。

参考文献:

- [1] 赵锡宏,李蓓,杨国祥,等.大型超深基坑工程实践与理论[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 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.
- [3] 陈永福,曹明葆.上海地区软粘土的卸荷-再加荷变形特性[J].岩土工程学报,1990,12(2):9-17.
- [4] 刘国彬,侯学渊.软土的卸荷模量[J].岩土工程学报,1996,18(6):18-23.
- [5] 师旭超,汪稔,韩阳.卸荷作用下淤泥变形规律的试验研究[J].岩土力学,2004,25(8):1259-1262.
- [6] GB/T500123-1999,土工试验方法标准[S].

(责任编辑 刘存英)

作者: [张淑朝](#), [张建新](#), [任杰东](#), [张阳](#), [ZHANG Shu-chao](#), [ZHANG Jian-xin](#), [REN Jie-dong](#), [ZHANG Yang](#)
作者单位: [天津城市建设学院, 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津, 300384](#)
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2008, 25(3)
被引用次数: 2次

参考文献(6条)

1. [赵锡宏](#); [李蓓](#); [杨国祥](#) [大型超深基坑工程实践与理论](#) 2005
2. [潘林有](#); [胡中雄](#) [深基坑卸荷回弹问题的研究](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2002(01)
3. [陈永福](#); [曹明葆](#) [上海地区软粘土的卸荷-再加荷变形特性](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1990(02)
4. [刘国彬](#); [侯学渊](#) [软土的卸荷模量](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1996(06)
5. [师旭超](#); [汪稔](#); [韩阳](#) [卸荷作用下淤泥变形规律的试验研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2004(08)
6. GB/T 500123-1999. [土工试验方法标准](#)

本文读者也读过(10条)

1. [张淑朝](#). [张建新](#). [张阳](#). [任杰东](#) [基坑开挖卸荷土体回弹实验研究](#)[会议论文]-2008
2. [师晓权](#). [杨其新](#) [软土地区深基坑回弹量影响因素分析](#)[期刊论文]-[岩土工程界](#)2007, 10(6)
3. [石峰](#). [安璐](#). [徐舜华](#). [SHI Feng](#). [AN Lu](#). [XU Shun-hua](#) [工程降水对深基坑坑底回弹影响的FLAC3D分析](#)[期刊论文]-[天津城市建设学院学报](#)2009, 15(1)
4. [张云军](#). [宰金珉](#). [梅国雄](#). [ZHANG Yun-jun](#). [ZAI Jin-min](#). [MEI Guo-xiong](#) [基坑开挖的若干简化计算方法](#)[期刊论文]-[苏州科技学院学报\(工程技术版\)](#) 2005, 18(4)
5. [余旭东](#). [李彰明](#) [基于量纲分析的冲击荷载作用下饱和软粘土孔压增长模型研究](#)[期刊论文]-[广东建材](#)2009, 25(7)
6. [李辉](#). [曾月进](#). [胡兴福](#). [朱万林](#). [曾明顺](#). [LI Hui](#). [ZENG Yuejin](#). [HU Xingfu](#). [ZHU Wanlin](#). [ZENG Mingshun](#) [土体卸荷回弹变形的试验研究](#)[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#)2008, 34(3)
7. [周健](#). [王浩](#). [蔡宏英](#). [黄茂松](#) [软土卸载孔压特性的试验与理论计算分析](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#)2002, 24(5)
8. [邓指军](#) [基坑卸荷回弹特性的试验及研究](#)[学位论文]2008
9. [付艳斌](#). [朱合华](#). [杨骏](#). [FU Yanbin](#). [ZHU Hehua](#). [YANG Jun](#) [软土卸荷时效性及其孔隙水压力变化试验研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#)2009, 28(z1)
10. [汤永军](#). [姚建阳](#). [吴敏](#). [TANG Yong-jun](#). [YAO Jian-yang](#). [WU Min](#) [基坑回弹引起钻孔灌注桩断桩的原因分析](#)[期刊论文]-[工程质量](#)2007(2)

引证文献(2条)

1. [熊卫兵](#). [石长礼](#). [杨子良](#) [盾构法隧道开挖卸荷回弹试验研究](#)[期刊论文]-[上海国土资源](#) 2011(2)
2. [侯晓亮](#). [周建华](#). [赵晓豹](#). [李晓昭](#) [南京河西淤泥质粉质粘土卸荷回弹变形研究](#)[期刊论文]-[防灾减灾工程学报](#) 2011(4)