

北京地区深大基坑回弹问题研究

贾 亮

北京意诚远耀勘测设计有限公司 北京市 100161

摘 要: 本文结合典型工程实例对深大基坑回弹问题进行了分析总结, 主要涉及到基坑卸荷回弹量估算方法、基坑回弹变形趋势、影响回弹变形的的主要因素、考虑回弹变形可能造成的安全问题等。结合工程实例提出了简便实用的回弹量计算方法, 有助于类似工程的变形监测实施与分析, 可供同类工程参考进行支护设计、变形预测等。

关键词: 深大基坑; 回弹; 影响因素; 影响范围; 稳定性评价; 计算模型

Research on springback of deep foundation pit in Beijing

Liang Jia

Beijing Yicheng yuanyao survey and Design Co., Ltd. Beijing 100000

Abstract: combined with typical engineering examples, this paper analyzes and summarizes the springback of deep and large foundation pit, mainly involving the estimation method of foundation pit unloading springback and foundation pit springback. Deformation trend, main factors affecting springback deformation, and safety problems that may be caused by springback deformation. Combined with engineering examples, a simple and practical calculation method of rebound is proposed, which is helpful for the implementation and analysis of deformation monitoring in similar projects, and can be used as a reference for similar projects to carry out support design, deformation prediction, etc.

Keywords: deep and large foundation pit; Rebound; Influencing factors; Scope of influence; Stability evaluation; computational model

一、引言

近几年, 随着城市建设的不断发展, 产生了大量的基坑工程, 且深大基坑数量不断增多。如何确保深大基坑的安全施工, 减小基坑施工对周边环境的影响尤为重要。通过对近几年深大基坑变形规律进行分析, 发现深大基坑的回弹变形是较为突出的问题。深大基坑的卸荷后回弹量预测、回弹深度、回弹范围、影响回弹因素等都值得关注与分析。这对基坑整体稳定性、建筑物沉降量估算、垫层厚度设计、周边环境稳定性影响等都具有重要意义。

二、研究现状

深大基坑回弹问题一直都是业界人士关注和研究的主要方向, 国内也进行过很多的工程实测, 还有人进行过专项实验研究。而回弹的影响因素较多, 且其中的地质条件本身就具有很大的不确定性, 故并未形成较为成熟的研究成果。基坑回弹量的计算方法主要有《规范法》, 理论公式和经验公式等等, 但并未找出一种实用、方便的计算方法能够有效的解决基坑回弹量问题。北京

地区尚无人进行过专项的统计及研究, 仅有部分人员对北京个别工程的回弹问题进行过利用和说明, 但并未对北京地区不同区域的地质条件差异进行统计分析。

一直以来基底回弹是人们关注的重点, 忽略了基坑支护结构及周边环境的回弹问题, 或多数人认为支护结构及周边环境不存在回弹, 对此也并未进行过深入研究。

三、工程实例

1. 工程实例一

(1) 工程概述

某工程由1栋地上56层办公/住宅楼和1栋地上4层商业楼组成, 主体建筑之间及外围为纯地下室, 除连接通道为地下2层外, 其余建筑部分均设4层地下室。本工程基坑南北边坡长175m, 东西边坡分别为73m和65m, 基坑呈近似等腰梯形, 基坑深度17.55 ~ 23.55m。

本工程监测点在基坑中央及典型的纵横剖面布置, 点间距为10~30m。本工程共布设9个基坑回弹监测点。

(2) 监测结果

回弹监测点均在基坑开挖前埋设, 并采集初始值,

基坑开挖完成后最终得到了其他6个点的监测数据,6个监测点的回弹量分别为:2#点72.70mm、3#点77.52mm、5#点70.31mm、7#点81.34mm、8#点98.76mm、9#点83.81mm。

(3) 初步结论

开挖深度最大区域的基坑中部8#监测点回弹量最大,反之,基坑边缘部位2#、3#、5#、9#监测点回弹量较小;而开挖深度较大的基坑区域(7#、8#、9#监测点)回弹量明显大于开挖深度较小的基坑区域(2#、3#、5#监测点)。

2. 工程实例二

(1) 工程概述

某工程地上建筑为西翼4层及东翼6层,地下结构层数为3层(局部4层)。基坑东部开挖深度为18.53m,西部开挖深度为22.73m,基坑东西长约260m,南北宽约99m,基坑采用直立挡墙+桩锚支护体系。支护桩坎固(埋入坑底)深度为12.5m。

本工程进行了综合性第三方监测,主要进行回弹监测及基坑支护体系和周边环境第三方监测。共布设了12个回弹监测点,支护结构顶部共布设了27个沉降监测点。

(2) 监测结果

回弹监测点在基坑开挖前埋设并采集初始值,基坑开挖至设计标高后得到了8个回弹点的监测数据。各监测点回弹量如表1。

表1 地基回弹量统计表

点号	回弹量/mm	开挖深度/m	点号	回弹量/mm	开挖深度/m
T1	50.79	22.73	T7	57.35	18.53
T2	54.15	22.73	T9	49.81	22.73
T3	55.98	22.73	T11	53.41	22.73
T4	53.15	22.73	T12	53.60	22.73

基坑开挖支护施工期间对支护结构顶部进行了沉降监测,沉降监测结果如表2。

表2 坡顶回弹量统计表

点号	回弹量/mm	点号	回弹量/mm	点号	回弹量/mm
HPC3	3.35	HPC12	11.77	HPC21	16.26
HPC4	8.67	HPC13	8.24	HPC22	9.66
HPC5	11.33	HPC14	5.07	HPC23	4.58
HPC6	12.57	HPC15	5.72	HPC24	6.43
HPC7	13.58	HPC16	7.00	HPC25	8.74
HPC8	12.17	HPC17	3.87	HPC26	9.38
HPC9	11.30	HPC18	9.45	HPC27	6.44
HPC10	13.82	HPC19	12.77	HPC28	7.86
HPC11	12.51	HPC20	12.92	HPC29	10.51

(3) 初步结论

基坑开挖至设计标高时基地回弹量整体较为平均,未发现因开挖深度和区域不同的明显变化。支护结构整体有所回弹,最大回弹量为16.26mm,为基坑南侧中部的21#号监测点。基坑南北两侧长边的回弹量大于东西两侧短边回弹量,长边中部回弹量大于两端回弹量。

3. 工程实例三

(1) 工程概述

某工程包括两幢超高层塔楼、配套裙房及纯地下车库,总建筑面积约50万m²。基坑开挖深度整体约27.5m,局部加深至29.5m。基坑开挖面积较大,约合43000m²,基坑周长1020m,主要采用直立挡墙+桩锚支护体系。支护桩坎固(埋入坑底)深度为8.5m。

本工程同样进行了“工程实例二”的综合性第三方监测。本工程共布设52个支护结构顶部沉降监测点,59个地表沉降监测点。

(2) 监测结果

通过监测,发现土方施工期间基坑自身支护结构及周边环境均有不同程度的回弹。其中基坑支护结构顶部最大回弹量为42.06mm,位于两个局部加深区域基坑阳角处的46#监测点;坡顶平均回弹量为21.78mm。各监测点监测结果详见表3:

表3 坡顶回弹量统计表

点号	回弹量/mm	点号	回弹量/mm	点号	回弹量/mm
1	17.76	19	13.22	36	12.69
2	22.64	20	13.72	37	11.93
3	25.33	21	12.80	38	12.42
4	25.30	22	8.21	39	20.30
5	25.31	23	28.49	40	24.77
6	25.23	24	23.28	41	26.29
7	24.41	25	19.60	42	28.68
8	19.33	26	17.61	43	27.84
9	14.59	27	16.28	44	31.14
10	14.64	28	18.57	45	39.92
11	22.87	29	19.58	46	42.06
12	9.32	30	29.77	47	34.74
14	24.10	31	29.00	48	30.64
15	22.55	32	23.74	49	26.56
16	27.57	33	20.73	50	24.26
17	22.94	34	18.27	51	18.04
18	9.43	35	18.53	52	14.79

基坑周边地表亦有不同程度的回弹,详细变形情况如表4所示:

表4 周边地表回弹量统计表

点号	回弹量/ mm	点号	回弹量/ mm	点号	回弹量/ mm
16	4.29	23	4.44	34-1	6.33
15	5.78	24	3.20	34-2	3.97
14	10.32	25	4.14	34-3	-3.18
13	13.95	26	11.74	35-1	8.17
12	16.97	27	27.77	35-2	
11	17.90	28	21.53	35-3	-0.46
10	17.96	29	11.10	36-1	10.32
9	22.32	30-1	-1.54	36-2	6.42
8	12.35	30-2	0.82	36-3	-1.18
7	10.80	30-3	-0.92	37-1	10.75
6	7.56	31-1	6.84	37-2	6.93
5	4.92	31-2	2.40	37-3	-0.77
4	5.90	31-3	0.60	38-1	13.91
17	6.36	32-1	7.16	38-2	6.07
18	3.43	32-2	2.66	38-3	-1.06
19	7.14	32-3	1.71	39-1	6.21
20	5.21	33-1	7.87	39-2	4.80
21	6.66	33-2	3.81	39-3	-1.42
22	3.99	33-3	0.54		

基坑西侧坡顶监测点平均回弹量为28.43mm，对应地表监测点平均回弹量为11.62mm。基坑东南侧坡顶监测点平均回弹量为18.29mm，对应距基坑3.5m远的地表监测点平均回弹量为8.62mm；对应距基坑7.5m远的地表监测点平均回弹量为4.63mm；对应距基坑15.0m远的地表监测点平均回弹量为-0.58mm。基坑南侧坡顶监测点平均回弹量为21.01mm，对应地表监测点平均回弹量为8.98mm。

(3) 初步结论

地表监测点回弹量明显小于支护结构顶部回弹量，而离基坑越近，开挖深度越大，回弹量越大。其回弹变形趋势分布与支护结构顶部相一致。

四、回弹规律分析及模型建立

通过上述工程实例及相关研究资料可以看出，基坑回弹主要为基坑开挖过程中，开挖面以上土体的卸荷即自重应力的减小所致；而回弹后土体的松弛与蠕变影响又加大了变形；随着开挖深度的增加，基坑内外压力差的增大，进而又引起支护结构的变形与坑外土体的位移，基坑周围土体在自重应力作用下是坑底变形加大，亦为构成基坑回弹的一个影响因素。

1. 规律分析

①基坑回弹量主要影响因素为卸荷量、工程地质及水文地质条件，次要影响因素为基坑开挖尺寸（或面积）、卸荷速度、基坑周边环境应力影响、施工工序等。

②基坑回弹变形呈由中心向四周逐步减小的趋势，基坑围护结构及周边地表也有不同程度回弹变形，周边回弹范围因开挖深度和开挖尺寸（面积）的不同而不同，通过上述实例可以看出，周边环境回弹范围约为D/2（D为开挖深度）。

③回弹变形为基坑土方卸荷后的正常物理反应，大部分回弹变形为工程安全所能接受，在充分认识回弹变形机理，做好回弹监测或回弹分析后做好基坑支护及地基基础设计等工作即可避免因回弹变形造成的安全事故。

2. 模型建立

为获得方便可靠，实用的回弹计算公式，定义如下公式：

①卸荷比或卸荷水平R

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

②回弹率δ

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

式中 e_{\min} 为最大预压荷载下的孔隙比， e_i 为对应卸荷后上覆荷载下的孔隙比。

①回弹模量 E_r

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

式中 $n_0 = \frac{e_{\min}}{1 + e_{\min}}$ 为原位初始荷载下的土体空隙率。

②回弹计算公式参考压缩沉降的概念，如图1所示：

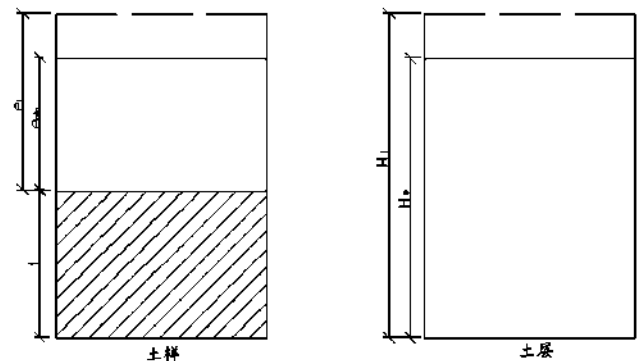


图1 回弹量计算公式推导

根据三相比例指标的关系，可以看出：

$$\frac{e_i - e_{\min}}{1 + e_{\min}} = \frac{H_i - H_0}{H_0} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (4)$$

分别将式（1）、（2）、（3）带入式（4），则有：

$$S = \sum n_{0i} \delta_i H_{0i} = \sum \left(\frac{P_{\max}}{E_r} \right)_i \cdot R_i \cdot H_{0i} \quad (5)$$

五、回弹量实例计算

下面利用工程实例二的设计条件，基坑较大，且

东西部开挖深度不同, 暂按照西部开挖深度较大的区域进行统计, 西部基坑长 $L=80\text{m}$, 宽 $B=40\text{m}$, 开挖深度 $D=22.73\text{m}$, 利用上述模型估算基坑中心点(T3点)最大回弹量。

1. 最大回弹层和强回弹层的确定

根据 $R=0.2$ 确定坑底最大回弹层厚度, 可以写出:

$$R = \frac{\alpha\gamma D}{\gamma(D+Z)} \leq 0.2 \quad (6)$$

式中 α 为竖向附加应力系数, Z 为回弹层厚度, 根据式(6)可得出:

$$\alpha \leq 0.2(1 + \frac{Z}{D})$$

根据附加应力系数 α 查询表可以得出, 在 $\alpha=0.526$ 时, $Z=37.0\text{m}$ 。

同理, 按 $R \geq 0.8$ 计算强回弹区 Z_i , 因强回弹区处于坑底不深处, 因此可以近似取 $\alpha=1$, 则 $Z_i=0.25D \approx 5.7\text{m}$ 。

2. 回弹量计算

根据勘察报告, 约为上部土层 $\gamma=18\text{KN/m}^2$, $E_r=80\text{MPa}$; 下部土层 $\gamma=19\text{KN/m}^2$, $E_r=125\text{MPa}$ 。则强回弹区回弹量 S_1 和回弹区回弹量 S_2 分别为:

$$S_1 = \frac{P_{\max}}{E_{r1}} \cdot R \cdot Z_i = 23.32\text{mm}$$

$$S_2 = \frac{\gamma[D + \frac{Z_{\max}}{2}]}{E_{r2}} \cdot R \cdot (Z_{\max} - Z_K) = 39.23\text{mm}$$

总回弹量 $S=S_1+S_2=62.55\text{mm}$, 而该点实际观测回弹量为 55.98mm , 其计算误差率为 11.7% 。

3. 回弹成果统计

北京市近些年进行了多个工程的回弹量实测, 测量结果与基坑开挖尺寸相关信息统计如表5所示:

表5 坡顶回弹量统计表

工程编号	基坑尺寸 ($B \times L/D$) m	回弹量/mm	回弹量与D 的比值
1	260 × 99/22.73	52.98	0.23%
2	175 × 69/17.55	73.50	0.42%
3	175 × 69/23.55	87.97	0.37%
4	80 × 24/11.44	24.35	0.21%
5	62 × 28/10.63	15.38	0.14%
6	102 × 46/23.14	45.50	0.20%
7	128 × 98/7.32	22.84	0.31%
8	128 × 98/11.04	44.69	0.40%
9	106 × 52/8.17	11.05	0.14%
10	300 × 250/11	26.63	0.24%
11	13 × 7/8.46	24.71	0.29%
12	244 × 127/14.53	48.92	0.34%
平均值			0.28%

六、结论

本文对北京地区实际回弹监测工程进行了总结分析, 对回弹量计算进行了验证。可以得出如下结论:

①影响基坑回弹的主要因素为工程地质条件及开挖深度, 次要影响因素为基坑开挖尺寸(面积)、卸荷速度、露槽时间、地下水位等。

②文献[1]提出北京地区回弹量与开挖深度之间的关系为 $(0.15\% \sim 1.0\%)D$ 。根据表5统计情况, 北京地区基坑实际回弹量与开挖深度的关系可界定在 $(0.15 \sim 0.50)\%D$, 这对类似工程的回弹预测与设计将发挥重要意义。

③北京地区回弹比整体呈由东向西, 由南向北逐渐较小的趋势。

④根据上述计算, 可以用卸荷比小于0.2的临界条件来预估回弹区深度, 基坑强回弹区厚度约为开挖深度的1/4左右, 即卸荷比为0.8。本工程实例的强回弹区厚度仅为5.7m, 故减少露槽时间, 及时施工垫层也是减少回弹保护地基土的有效措施。

⑤本文有依据的提出了回弹量实用简易的计算方法, 但因不同工程的参数不确定性和回弹层厚度难以确定性, 尚有待于进一步验证与研究。

⑥本文回弹比统计样本数量有限, 尤其无南部区域回弹监测成果, 回弹比等值线图依据有限实际监测成果绘制, 仍需进一步验证与完善。

参考文献:

[1] 窦华港, 焦莹. 深基坑基底回弹变形计算方法分析及工程验证[J]. 天津城市建设学院学报, 第14卷第3期, 2008年9月。

[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, 第24卷第1期, 2002年1月。

[3] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994。

[4] 李德宁, 楼晓明, 杨敏. 基坑回弹变形计算方法研究及应用[J]. 岩土力学与工程学报, 第31卷第9期, 2012年9月。

[5] 周健华. 深基坑开挖卸荷回弹、隆起的影H向因素及防治措施[J]. 中国水运, 第11卷第9期, 2011年9月。