

短文

深基坑卸荷回弹问题的研究

Experimental study on the resilience of pit under unloading

潘林有¹, 胡中雄²

(1. 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325027; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

中图分类号: TU 473. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2002) 01- 0101- 04

作者简介: 潘林有(1963-), 男, 浙江乐清人。副教授, 副院长, 工学硕士, 长期从事教学和科研工作。

1 概 述^{*}

高层建筑的基坑, 地铁车站的基坑, 面积大, 开挖深, 对这类大规模卸荷情况, 如何准确预测坑底的回弹变形量, 一直为工程界所重视。但至今还没有一个比较好的估算方法。因土不是纯弹性体, 因此, 在不同应力路径条件下, 其性质变化有很大的差异。所以本文首先从试验研究出发, 遵循土的卸荷特性, 提出一个简易的估算方法, 以供实际工程参考。

2 室内土工试验设计

为了模拟大面积卸荷, 采用常规的固结回弹试验。试验土样来自温州地区浅层原状粉质粘土。基本物理属性为含水率 45%, 容重为 17. 9 kN/m³, 干容重 12. 4 kN/m³, 初始孔隙比 $e_0 = 1. 187$ 。为了取得比较充分的数据, 共进行四组平行试验。试验土样为原状土, 按土工试验规定制备, 在多联固结压力仪上预压, 每组土样预压荷载分别为 125, 200, 300, 400 kPa, 待固结稳定后, 按不同比例卸荷, 试验原始数据见表 1。经整理试验结果如图 1 所示。从图 1 可以看出该试验结果具有以下特点: ①所有的回弹路径几乎是一组平行线。②不论初始应力水平的大小, 当卸荷量比较小的时候, 回弹路径是一条水平线, 即不发生回弹变形。这一性质与加荷条件前期固结压力曲线具有相似性质^[1]。③当卸荷量(卸荷水平)达到一定数量时, 才有较大的回弹变形发生。④当荷载全部卸除, 最大回弹量与初始应力水平(即预压荷载)有关。

3 资料成果分析

为了寻求土样在卸荷条件下回弹变形的基本规律, 现提出下列指标定义:

(1) 卸荷比或卸荷水平 R

$$R = \frac{p_{\max} - p_i}{D_{\max}} \quad (1)$$

式中 $p_{\max}$ 为最大预压荷载, 或初始上覆荷载; p_i 为卸荷后上覆荷载。

卸荷比与超固结比 OCR 虽概念相似, 但后者加荷时间长, 适于理论、学术研究, 而前者(本文所提的卸荷比)加荷时间较短, 更适合实际工程。

(2) 回弹率

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

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

(3) 回弹模量 E_r

回弹模量表示卸荷应力与回弹应变之比, 即

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

式中 n_0 为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, 将试验结果重新整理, 见表 2 所示。

从表 2 的试验成果, 发现有以下规律:

(1) 最大回弹率 $\delta_{\max}$ 与预压荷载的关系

最大回弹率为某预压荷载 $p_{\max}$ 下所有试样中回弹率的最大值, 如表 1 中 0. 108 即为 $\delta_{\max}$ 。

图 2 表示最大回弹率 $\delta_{\max}$ 与预压荷载 $p_{\max}$ 的关系, 可以看出, 图 2 具有明显的线性关系, 预压荷载越大, 完全卸荷后土的回弹率也越大。这一规律说明, 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) 平均回弹率 $\bar{\delta}$ 与卸荷比 R 的关系

平均回弹率 $\bar{\delta}$ 为某预压荷载下多组试样回弹率的平均值。

将平均回弹率 $\bar{\delta}$ 与卸荷比 R 之间的关系, 整理在半对数坐标系统中, 见图 3 所示, R 与 $\lg \bar{\delta}$ 之间具有明

表 1 室内实测原始数据($p_{\max} = 200 \text{ kPa}$)

Table 1 The original data of laboratory test

p /kPa	e_i				δ				$\bar{\delta}$
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	
0	1.053	1.056	1.010	1.033	0.100	0.108	0.106	0.103	0.104
50	0.982	0.979	0.935	0.959	0.026	0.027	0.024	0.024	0.025
100	0.965	0.963	0.919	0.944	0.008	0.010	0.007	0.009	0.008
125	0.962	0.958	0.916	0.940	0.005	0.005	0.003	0.004	0.004
150	0.959	0.956	0.914	0.938	0.002	0.003	0.001	0.002	0.002
175	0.957	0.955	0.913	0.936	0	0	0	0	0
200	0.957	0.953	0.913	0.936	0	0	0	0	0
$e_{\min}$	0.957	0.953	0.913	0.936	$\bar{e}_{\min} = 0.939$				

注: 表中 $e_i = (1 + e_0)(1 - \Delta H/H) - 1$, 计算时已考虑仪器变形; δ, R 公式见本文式(1), (2)

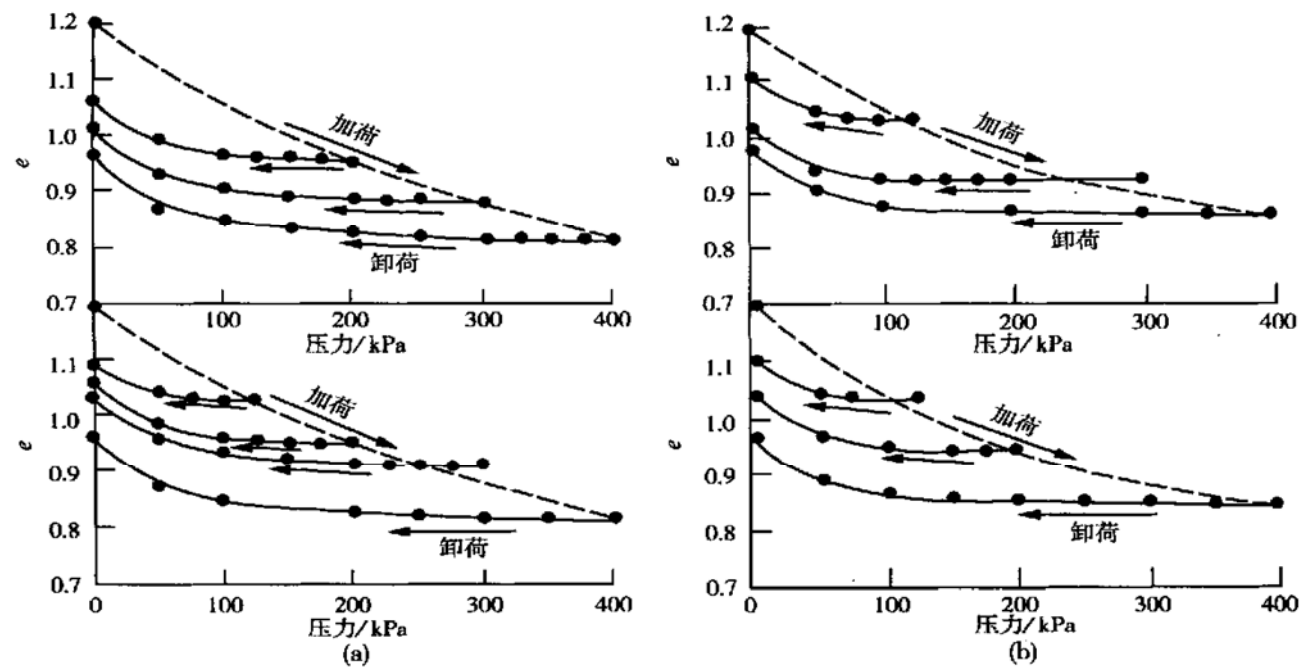


图 1 4 组卸荷回弹试验

Fig. 1 Four unloading tests

表 2 试验成果汇总表

Table 2 The experimental results

R	$p = 125 \text{ kPa}$		$p = 200 \text{ kPa}$		$p = 300 \text{ kPa}$		$p = 400 \text{ kPa}$		E_r	δ
	E_r/kPa	δ	E_r/kPa	δ	E_r/kPa	δ	E_r/kPa	δ		
1.00	3.375×10^3	7.3×10^{-2}	4.378×10^3	1.0×10^{-1}	5.463×10^3	1.3×10^{-1}	6.61×10^3	1.6×10^{-1}	4.957×10^3	1.2×10^{-1}
0.80	9.330×10^3	4.1×10^{-2}	1.142×10^4	4.1×10^{-2}	1.710×10^4	3.4×10^{-2}	2.225×10^3	4.1×10^{-2}	1.002×10^4	3.9×10^{-2}
0.60	1.529×10^4	9.6×10^{-3}	2.148×10^4	1.5×10^{-2}	3.131×10^4	1.4×10^{-2}	3.966×10^4	1.6×10^{-2}	1.278×10^3	2.7×10^{-2}
0.50	2.224×10^4	6.6×10^{-3}	2.705×10^4	8.1×10^{-3}	3.971×10^4	8.7×10^{-3}	4.936×10^4	1.1×10^{-2}	3.459×10^4	8.5×10^{-3}
0.40	2.918×10^4	3.7×10^{-3}	3.572×10^4	5.0×10^{-3}	5.905×10^4	5.4×10^{-3}	6.412×10^4	6.7×10^{-3}	4.702×10^4	5.2×10^{-3}
0.25			5.493×10^4	2.0×10^{-3}	7.544×10^4	2.3×10^{-3}	8.968×10^4	3.0×10^{-3}	7.335×10^4	2.4×10^{-3}
0.20	0	0		0		1.1×10^{-3}		1.2×10^{-3}		

显的直线关系。 R 越大, $\bar{\delta}$ 越大。从表 2 发现, 当卸荷比 R 小于 0.2 时, 初始预压荷载小的土样, 回弹率 $\delta \approx 0$ 。而初始预压荷载比较大的土样, 还有微少的回弹量, 如果把这部分回弹微量忽略, 则可以把卸荷比 $R = 0.2$ 视作回弹变形的临界条件。

也就是说基底以下, 卸荷比小于 0.2 的土体不发生回弹变形。在实际工程中, 可以用来预估回弹区的深度。

(3) 卸荷回弹模量 E_r 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 $R > 0.8$ 时, E_r 将迅速减少;当 $R < 0.8$ 时, E_r 随 R 的减少而直线增大。因此,可以把转折点 $R = 0.8$ 看作回弹区的下边界。

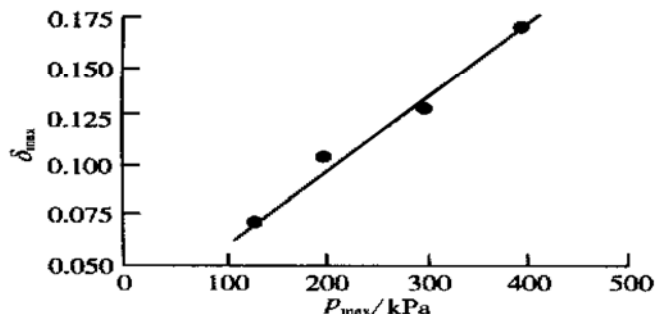


图2 最大回弹率 $\delta_{\max}$ 与最大预压荷载 $p_{\max}$ 的关系

Fig. 2 Relation between $\delta_{\max}$ and $p_{\max}$

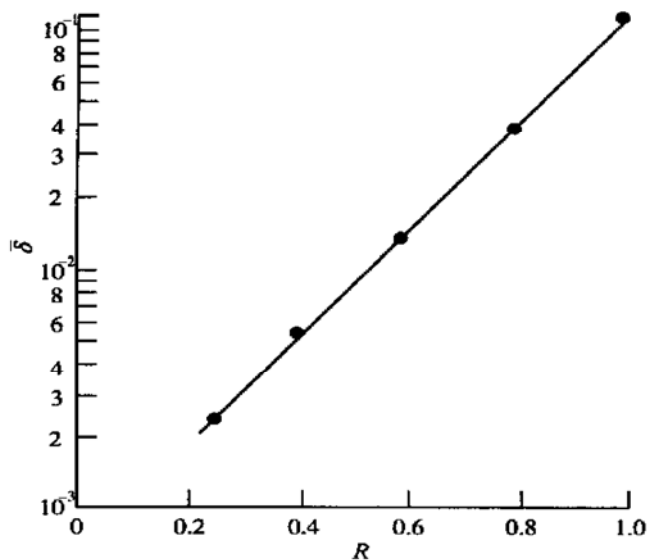


图3 $\bar{\delta}$ - R 关系

Fig. 3 $\bar{\delta}$ versus R

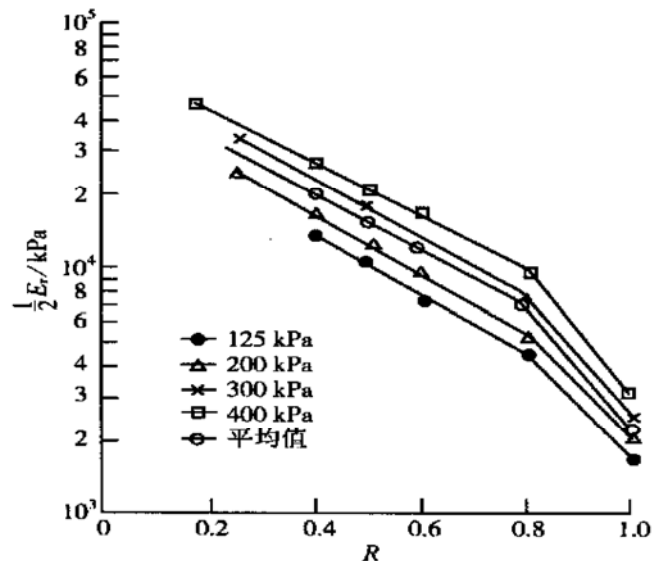


图4 E_r - R 关系

Fig. 4 E_r versus R

4 回弹量计算公式

回弹计算公式的推导可参考压缩沉降的概念^[2], 见图5所示, 根据三相比例指标的关系, 可以看出:

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

$$\Delta H = \frac{e_i - e_{\min}}{1 + e_{\min}} H_0$$

将式(2)代入式(4)

$$\Delta H = \frac{e_{\min}}{1 + e_{\min}} \cdot H_0 = n_0 H_0 \quad (5)$$

基底的总回弹量

$$S = \sum \Delta H = \sum n_{0i} \delta_i H_{0i} \quad (6)$$

将卸荷比 R 的概念引入公式(4), 还可以写成

$$\Delta H = \frac{p_{\max}}{E_r} \cdot R H_0 \quad (7)$$

$$S = \sum \left(\frac{p_{\max}}{E_r} \right)_i \cdot R_i \cdot H_{0i} \quad (8)$$

式中 $p_{\max}$ 为初始上覆荷载。

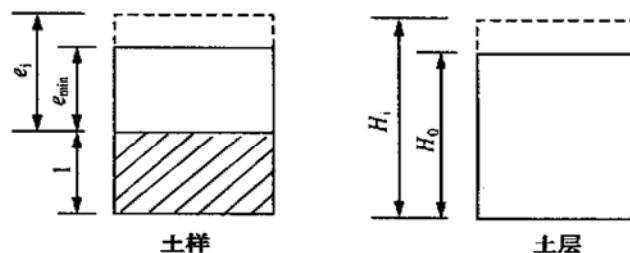


图5 回弹量计算公式推导

Fig. 5 The derivation of formula to calculate resilience

5 回弹量计算实例

为便于工程上应用, 现举一算例作示范。假设基坑宽 25 m, 长 50 m, 开挖深度 10 m。试估算基坑中心最大回弹量, 土层均匀, $e_{\min} = 0.92$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^2$, 回弹参数按表1或图3, 4查取。

(1) 最大回弹层和强回弹层确定

根据 $R = 0.2$ 确定坑底最大回弹层厚度, 见图6, 可写出

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

式中 α 为矩形面积上均布荷载作用下, 基坑中点下竖向附加应力系数。具体计算时可查土力学教材中附加应力系数表^[2]。

假定回弹层厚度 $Z_{\max} = 20 \text{ m}$, 由 $m = Z/B = 20/25 = 0.8$, $n = l/B = 2.0$, 查得 $\alpha = 0.593$, $R = \frac{\alpha D}{\gamma(D + Z)} =$

$$\frac{10 \times 0.593}{10 + 20} = \frac{5.93}{30} = 0.197 \approx 0.2。$$

同理,按 $R \geq 0.8$ 计算强回弹区 Z_k , 因为强回弹区处于坑底下不远处, 因此可以近似地取 $\alpha = 1$, 则 $R =$

$$\frac{\gamma D}{\gamma(D + Z_k)}, Z_k = \frac{1 - R}{R} D = 0.25D = 2.5 \text{ (m)}。$$

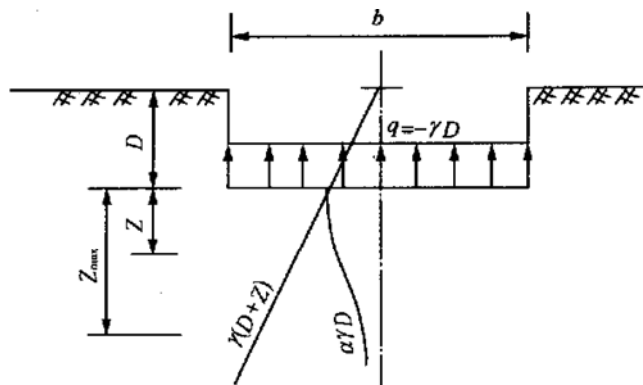


图6 回弹量计算实例

Fig. 6 An example of calculating resilience

(2) 回弹量计算

因土层均匀,可按公式(8)计算,回弹量由强回弹区 S_1 和回弹区 S_2 两部分构成,即

$$S_1 = \frac{\bar{p}_{\max}}{\bar{E}_{r1}} \cdot \bar{R} \cdot Z_k = 6.1 \text{ (cm)}$$

$$S_2 = \frac{r[D + \frac{1}{2}(Z_{\max} + Z_k)]}{\bar{E}_{r2}} \cdot R \cdot (Z_{\max} - Z_k) = 4.20 \text{ (cm)}$$

$$\text{总回弹量 } S = S_1 + S_2 = 10.3 \text{ (cm)}。$$

在上面 S_2 的计算中, R 应根据 $\frac{1}{2}(Z_{\max} + Z_k)$ 深度查附加应力系数表求 α , 再计算 R 值, 并由 R 再查表 2 确定 $\bar{E}_{r2}$ 值。

若按公式(6)计算, 先计算回弹层中点处的 R 值。回弹层中点处 $Z = 10 \text{ m}$, 则 $Z/B = 0.4$, 查得 $\alpha = 0.87$, 得 $R = 0.435$, 通过 R 求得 $\bar{\delta} = 6.36 \times 10^{-3}$ 。土层孔隙率 $n_0 = 0.479$ 。那么 $S_1 = 9.22 \text{ cm}$, $S_2 = 5.33 \text{ cm}$, $S = S_1 + S_2 = 14.55 \text{ cm}$ 。

6 结论与讨论

(1) 本文提出的卸荷回弹量计算方法是为工程实用服务的简易方法, 主要特点是通过对比土样回弹路径

特性作了深入试验分析, 比较有依据地提出了回弹区和强回弹区的范围。并定义了卸荷比, 回弹率和回弹模量的指标和试验方法。计算方法也比较简单, 具有较大的实用价值。

(2) 关于回弹区范围的问题。回弹区的下边界定义在卸荷比 $R \leq 0.2$ 处, 这是根据试验结果提出的, 由于试验数据较少, 今后随着资料积累会有所调整, 特别是通过现场实测资料验证, 加以修正。回弹区深度与基坑宽度有关, 对于大面积卸荷情况, $\alpha \approx 1$, 则极限回弹区深度为 $4D$ 。基坑宽度越小, 回弹区深度也越小。

(3) 关于强回弹区的问题及试验结果表明, 卸荷比超过 0.8 时, 回弹模量急剧降低。回弹率快速增加, 计算结果发现, 强回弹区的厚度仅 2.5 m, 回弹量占了一半以上。这充分说明坑底浅层保护的重要性。避免挖动, 减少坑底暴露时间, 及时施工垫层都是减少回弹量的有效措施。

再从卸荷比公式 $R = \frac{\alpha \gamma D}{\gamma(D + Z)}$ 可以看出, 在坑底附近强回弹区 $\alpha \approx 1$, 则可改写成 $\frac{1}{1 + Z_k/D} = 0.8$, 因此有 $Z_k/D = 0.25$, $Z_k = \frac{1}{4}D$ 。这样从理论上说明了强回弹区的厚度是一个常数, 约为开挖深度的 $\frac{1}{4}$ 左右。

(4) 本文试验采用的土样比较局限, 尚需对其他类型的土样进行试验研究, 以便确定本文方法的适用性。例如图 2 仅用于本次试验土样, 而对其他土可能 E_r 并非常量。

(5) 本文虽然提出了一种估算的方法, 但还缺少实测资料的验证, 特别是对于强回弹区和回弹区边界的确定, 尚有待于进一步研究。

(6) 基坑底回弹量与很多因素有关, 如基坑开挖面积也是一个很重要的因素, 基坑预降水对其也有影响, 本文由于研究的局限, 对有关因素产生的影响未考虑。

参考文献:

- [1] 胡中雄. 土力学与环境土力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [2] 洪毓康. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.