

# 软土地区基坑回弹变形预测方法研究

谢征兵,俞峰,苟尧泊,刘念武

(浙江理工大学基础结构技术研究所,杭州 310018)

**摘要:** 基坑开挖卸荷过程伴随着坑底土层的回弹,可能对基坑稳定性和既有工程桩造成显著影响。现有的基坑回弹量预测方法有残余应力法和自重应力抵消法等,在此基础上提出了一种预测基坑回弹变形的新技术。该方法考虑开挖卸荷过程中超固结比与静止侧压力系数的联动变化关系,推出卸荷后各土层的初始残余应力以修正偏大的卸荷应力,并将土层的有效自重应力作为残余应力,再结合残余应力法计算回弹模量。通过5个工程实例与现有计算方法进行对比分析,表明该方法的计算结果与实测结果较匹配,用超固结比能够反映卸荷应力的变化。

**关键词:** 基坑开挖;卸荷回弹;残余应力;超固结比

**中图分类号:** TU 473.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2016) 03-0479-08

**引用页码:** 051103

## 0 引言

基坑开挖引起坑底土体的回弹并伴随着坑周土体的变形,其中坑底土体回弹量的大小直接影响到基坑稳定性和桩基的承载性状<sup>[1]</sup>。在基坑开挖前及开挖过程中准确地预测回弹量,对基坑的设计与施工起着一定的指导作用<sup>[2]</sup>。

目前基坑回弹变形估算方法很多,如残余应力法、自重应力抵消法等,由于卸荷应力及回弹模量的求解方法不同,导致各方法的求解结果差异较大<sup>[3]</sup>。其中,刘国彬等<sup>[4]</sup>提出残余应力的概念,根据上海工程地质特性总结出残余应力和回弹模量的计算公式。该方法考虑的工程参数多,计算公式复杂,且计算结果较实测值偏大。李德宁等<sup>[5]</sup>的自重应力抵消法将计算深度处的有效自重应力视为残余应力,通过常规压缩试验获取回弹模量,计算值较实测值偏小。该方法在确定回弹模量时没有考虑到回弹模量随土层应力的变化而变化<sup>[6]</sup>,致使回弹模量的取值与实际不符。此外,汪中卫等<sup>[7]</sup>、袁静等<sup>[8]</sup>研究均表明,基坑在开挖卸荷过程中静止侧压力系数会随超固结比OCR的变化而变化。土体受三向应力的影

响,残余应力不应仅考虑竖向应力的影响还应综合考虑侧向应力的影响。

本文根据卸荷前后静止侧压力系数 $K_0$ 的变化推出土层的初始残余应力,然后将土层的有效自重应力作为该层的残余应力,再结合残余应力法中回弹模量的计算公式,提出一种计算基坑回弹量的新方法(超固结比法),然后通过5个工程实例对几种方法进行对比分析。

## 1 回弹量的计算流程

残余应力法、自重应力抵消法和超固结比法均需计算基坑开挖过程中各土层的回弹应力 $\sigma_{zi}$ 和回弹模量 $E_{ii}$ ,然后按照下式进行计算:

$$S_r = \psi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{ii}} h_i \quad (1)$$

其中: $S_r$ 为总回弹量; $h_i$ 为各土层的厚度; $\psi$ 为考虑基坑宽窄影响的修正系数(仅适用于自重应力抵消法);其中回弹应力 $\sigma_{zi}$ 为卸荷应力 $P_0$ 与残余应力 $\Delta P$ 的差值即 $\sigma_{zi} = P_0 - \Delta P$ 。

3种方法都认为卸荷应力偏大应进行修正,但是修正的方法均不一样。残余应力法用经验公式

收稿日期:2015-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41472284);浙江省公益技术研究项目(2015C31006);浙江理工大学521人才培养计划

作者简介:谢征兵(1990-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事桩基工程方面的研究。

通信作者:俞峰,E-mail: pokfulam@163.com

进行修正,自重应力抵消法用有效自重应力进行修正,超固结比法用超固结比  $OCR$  进行修正。为与残余应力  $\Delta P$  进行区分,暂将卸荷应力修正值命名为初始残余应力  $\Delta P'$ 。目前回弹模量的计算方法较

少,以刘国彬等<sup>[4]</sup>的回弹模量计算公式考虑因素最多,结果最为精确。以下将结合图1,从回弹应力、回弹模量、回弹计算公式3个方面进行对比分析。

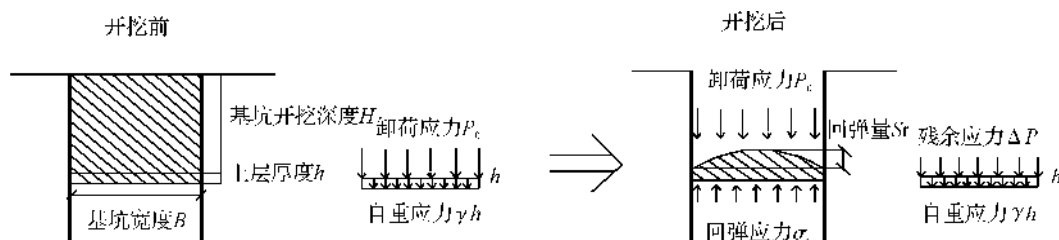


图1 基坑开挖及回弹示意

### 1.1 回弹应力

刘国彬等<sup>[4]</sup>认为土体在卸荷后残留在土层中的应力称之为残余应力,并结合上海地区大量实测数据,提出残余应力的经验公式。该公式缺乏合理的理论推导,且具有一定地域局限性。李德宁等<sup>[5]</sup>认为残余应力即为坑底土层计算深度处有效自重应力,残余应力公式具有合理的理论推导,但是单一的使用土体的有效重度来衡量残余应力与孙玉永等<sup>[9]</sup>提出的残余应力是反映土体的应力状态、卸荷应力路径、土体特性等因素的综合性参数相矛盾。

超固结比法综合了残余应力法和自重应力抵消法,既改善了使用单一的有效容重去衡量残余应力的不足,也避免了因使用经验公式而导致参数的不确定性。考虑到土体卸荷过程中静止侧压力系数  $K_0$  与超固结比  $OCR$  密切相关<sup>[7-8]</sup>,超固结比法通过卸荷后不考虑超固结比变化的土层竖向应力  $\sigma_1$  和考虑超固结比变化后的竖向应力  $\sigma_1'$  两者的差值来反映由卸荷引起的初始残余应力  $\Delta P'$ ,然后结合有效自重应力即为该层残余应力的思想,提出一种新的残余应力计算方法。以下结合图2对超固结比法进行解析。

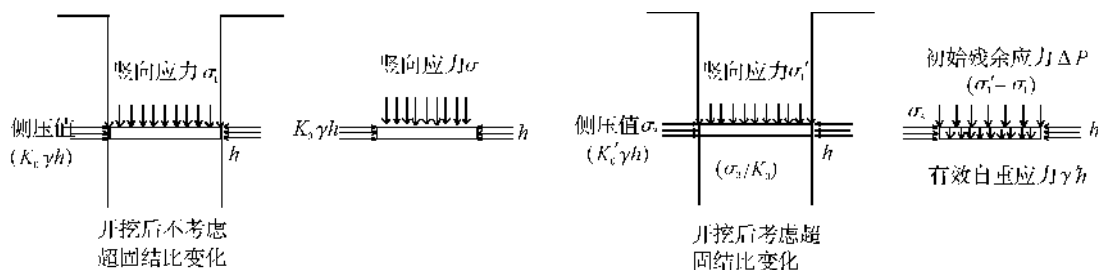


图2 超固结比法残余应力示意

开挖过程中,考虑到土体的三向应力状态,坑底中间位置竖向和水平向同时发生卸荷<sup>[8]</sup>。竖向卸荷引起固结比和水平向应力状态的变化,通过静止侧压力系数  $K_0$  与超固结比的关系可以反映开挖引起土体应力的变化<sup>[10]</sup>。

$$K_0' = K_0 \sqrt{OCR} \quad (2)$$

式中: $K_0'$ 为卸荷后静止侧压力系数;超固结比  $OCR = (p_0 + \sum \gamma_i h_i) / \sum \gamma_i h_i$ 。

卸荷后不考虑超固结比影响的竖向应力(土层的自重应力) $\sigma_1$ 为:

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i \quad (3)$$

卸荷后考虑超固结比影响的水平向应力  $\sigma_3$  为:

$$\sigma_3 = K_0' \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i \quad (4)$$

卸荷后考虑超固结比影响的竖向应力  $\sigma_1'$  为:

$$\sigma_1' = \left( \frac{K_0'}{K_0} \right) \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i \quad (5)$$

卸荷后竖向应力的变化值即为卸荷过程中残留在土层中未被释放出来的  $\Delta P'$ ,每层土体都会对应一个初始残余应力值,动态的修正偏大的卸荷应力:

$$\Delta P' = \sigma_1' - \sigma_1 = \left( \frac{K_0'}{K_0} - 1 \right) \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i \quad (6)$$

结合自重应力抵消法中将土体的有效自重应力  $\gamma_i' h_i$  作为该层自身残余应力的思想,在竖直方向上

土层只受初始残余应力与有效自重应力的作用,残余应力即为两者之和:

$$\Delta P = \Delta P' + \sum_{i=1}^i \gamma_i' h_i \quad (7)$$

## 1.2 回弹模量

刘国彬等<sup>[11]</sup>通过试验研究表明,软土地区土体应力路径对回弹模量的影响很大,土体的回弹模量随应力路径的变化而变化,并总结出回弹模量的计算方法,该方法计算结果与土体的实际情况最吻合。李德宁等<sup>[5]</sup>的自重应力抵消法在计算回弹量时同一土层的回弹模量取值相同,这明显与邓指军等<sup>[12]</sup>指出不同深度土体的回弹模量不同、同一深度的土体在不同开挖深度情况下回弹模量不同的观点相矛盾,故土层较厚时应当分层计算各层的回弹模量。

超固结比法在计算回弹模量时直接利用刘国彬等提出的回弹模量计算公式:

$$E_t = \{1 + [(\sigma_v - \sigma_H)(1 + 2K_0)(1 + \sin\varphi) - 3(1 + K_0)(1 + \sin\varphi)\sigma_m] / [2(C \cdot \cos\varphi + \sigma_H \sin\varphi)(1 + 2K_0) + 3(1 - K_0)(1 + \sin\varphi)\sigma_m] R_f\}^2 \overline{E}_{ui} \sigma_m \quad (8)$$

其中: $\sigma_v, \sigma_H$ 分别为竖向和水平向应力; $c, \varphi$ 分别为土的粘聚力和内摩擦角; $\sigma_m$ 为平均固结应力; $R_f$ 为破坏比; $\overline{E}_{ui}$ 为初始卸荷模量系数。

贾坚等<sup>[13]</sup>提出基坑的宽窄直接影响基坑土体的应力路径,对回弹模量的计算影响较大。考虑到空间效应和支护结构影响,窄基坑的坑底回弹量大于相同条件下的宽基坑。根据经验定义基坑宽度  $B > 2.5 H$  为宽基坑、 $B \leq 2.5 H$  为窄基坑。

a) 窄基坑的土体应力为:

$$\sigma_{vi} = \alpha_i \sigma_0 + \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i \quad (9)$$

$$\sigma_{Hi} = K_0 (\sigma_0 + \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i) - \frac{1}{R} \sigma_0 (1 - \alpha_i) \quad (10)$$

$$\sigma_{mi} = \frac{1 + 2K_0}{3} (\sigma_0 + \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i) \quad (11)$$

其中: $\sigma_{vi}, \sigma_{Hi}, \sigma_{mi}$ 分别为第*i*层土体的竖向应力、水平向应力和平均固结应力; $\sum \gamma_i h_i$ 为已开挖部分的土体重应力总和; $\alpha_i$ 为第*i*层土体的残余应力系数( $\Delta P/P_0$ );加卸荷比  $R = 2.0 \sim \infty$ ,其值取决于基坑的应力路径和宽窄程度; $\gamma_i, h_i$ 分别为第*i*层土体的重度 and 厚度。

b) 宽基坑的土体应力为:

$$\sigma_{vi} = \alpha_i \sigma_0 + \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i \quad (12)$$

$$\sigma_{Hi} = K_0 (\alpha_i \sigma_0 + \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i) \quad (13)$$

$$\sigma_{mi} = \frac{1 + 2K_0}{3} (\sigma_0 + \sum_{i=1}^i \gamma_i h_i) \quad (14)$$

$R_f$ 值一般介于  $0.75 \sim 1.0$ ,  $\overline{E}_{ui}$ 值一般介于  $80 \sim 250$ ,根据土体所经历的应力路径和自身的特性取值。

## 1.3 回弹计算

求得基坑各土层回弹应力值  $\sigma_{re}$  和回弹模量  $E_t$  后,按照回弹变形计算公式(1) 分层总和求出总值。

## 2 工程实例分析

### 2.1 上海环球金融中心裙房基坑工程

上海环球金融中心裙房基坑工程<sup>[5]</sup>地面以上为5层,地下3层。基坑长约216 m,宽约125 m,开挖深度达18 m,坑内土方总量约  $26 \times 104 \text{ m}^3$ ,保护等级为一级。该工程地质相关参数如下表1所示。

表1 案例1工程地质相关参数

土层名称	土层厚度 $h/\text{m}$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	静止侧压力系数 $K_0$
粘土	2.00	18.5	20	16.0	
粉质粘土	4.00	18.1	7	22.0	
粘土	10.25	17.3	10	14.5	
粉质粘土	6.35	18.8	10	14.0	0.48
粉质粘土	4.20	20.0	36	12.7	0.32
砂质粉土	9.60	19.1	2	25.6	0.30

a) 残余应力法

基坑开挖深度  $H = 18 \text{ m}$ ,基坑开挖宽度  $B > 2.5 H$ ,为宽基坑。最大计算深度  $h_r$  为  $13.9 \text{ m}$ ,残余应力系数  $\alpha = 0.3 + 0.00334 h^2 (0 \leq h \leq h_r)$  初始卸荷模量系数  $\overline{E}_{ui}$  为  $250$ ,破坏比  $R_f$  为  $0.89$ 。

b) 自重应力抵消法

自重应力抵消法中回弹指数  $C_s$  根据文献<sup>[14-16]</sup>的试验结果取值,其中粉质粘土为  $0.0313$ ,砂质粉土为  $0.02$ ,初始孔隙比  $e_2$  根据《上海岩土工程勘察规范》取  $1.0$ ,修正系数  $\phi$  取  $1.0$ 。(以下工程实例的回弹参数和初始孔隙比依照此案例的文献取值)

c) 超固结比法

计算中所需的土体重度和静止侧压力系数如上表所示。

用残余应力法、自重应力抵消法和超固结比法对此基坑回弹量进行计算,计算结果如表2—表4所示。所得最终回弹量分别为  $66.97, 32.89 \text{ mm}$  和  $62.44 \text{ mm}$ ,实测最大回弹量为  $36 \sim 46 \text{ mm}$ ,计算所得影响深度分别为  $13.9, 14.8 \text{ m}$  和  $18.8 \text{ m}$ 。

表2 残余应力法回弹量计算表

土层厚度 /m	残余应力 系数	回弹应力 /kPa	回弹模量 /MPa	回弹量 /mm
2	0.313 39	219.459	17.834	24.611
2.6	0.370 82	201.102	27.936	18.717
2	0.445 79	177.14	32.178	11.01
2.2	0.559 18	140.897	43.106	7.191
2	0.690 38	98.963	52.463	3.773
2	0.848 35	48.471	66.562	1.456
1.14	0.955 98	14.069	75.796	0.211
总回弹量			66.969	

表3 自重应力抵消法回弹量计算表

土层厚度 /m	浮重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	残余应力 /kPa	卸荷应力 /kPa	回弹应力 /kPa	回弹模量 /MPa	回弹量 /mm
2	8.8	10.12	139.625	129.505	18.513	13.991
2.6	8.8	30.36	139.625	109.265	30.005	9.468
2	8.8	50.98	139.625	88.645	39.704	4.465
2.2	10	71.98	139.625	67.645	48.389	3.075
2	10	91.58	139.625	48.045	88.41	1.087
2	9.1	109.78	139.625	29.845	99.946	0.597
2	9.1	127.98	139.625	11.645	111.323	0.209
总回弹量			32.893			

表4 超固结比回弹量计算表

土层厚度 /m	有效重度 / (kN/m <sup>3</sup> )	修正前残余应力 /kPa	修正后残余应力 /kPa	回弹应力 /kPa	回弹模量 /MPa	回弹量 /mm
2.00	8.8	78.295	95.895	223.730	17.175	26.053
2.60	8.8	100.923	141.403	178.222	31.934	14.511
2.00	10	111.056	171.536	148.089	36.456	8.124
2.20	10	118.576	201.056	118.570	46.650	5.592
2.00	9.1	123.354	217.148	102.478	51.849	3.953
2.00	9.1	127.097	249.577	70.048	62.652	2.236
2.00	9.1	130.118	272.598	47.027	71.908	1.308
2.00	9.1	132.613	295.093	24.532	81.142	0.605
2.00	9.1	134.711	317.191	2.434	90.357	0.054
总回弹量			62.44			

2.2 上海地铁一号线新客运站基坑

上海地铁一号线新客运站基坑<sup>[17]</sup>长约202 m, 20 m深地下连续墙,施工过程中设置两道钢支撑。宽约22.6 m,开挖深度达12.4 m,基坑支护方式为工程地质相关参数如表5所示。

表5 案例2工程地质相关参数

土层名称	层厚 $h$ /m	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	静止侧压力 系数 $K_0$
砂质粘土	3.0	19.0			
粉砂	9.4	18.9			
灰色淤泥质粘土	4.5	17.2	11	8	0.65
灰色粘土	未穿透	18.5	13	11	0.65

基坑开挖深度  $H=12.4$  m, 基坑宽度  $B=22.6$  m, 此基坑为窄基坑。最大计算深度  $h_r$  为13.1 m, 残余应力系数  $\alpha=0.3+0.0038h^2(0\leq h\leq h_r)$ , 初始卸荷模量系数  $\overline{E_u}$  为125.5, 破

破坏比  $R_f$  为 0.89。灰色淤泥质粘土与灰色粘土回弹指数  $C_s$  取 0.0313, 土体初始孔隙比  $e_2$  为 1.0, 修正系数取 2.0。

用残余应力法、自重应力抵消法和超固结比法计算此基坑回弹量值分别为 124、59.79 mm 和 97.68 mm, 实测最大回弹量 103 mm, 影响深度分别为 13.1、11.5 m 和 16 m。

表 6 案例 3 工程地质相关参数

土层名称	层厚 $h/\text{m}$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	静止侧压力系数 $K_0$
填土	2.5	18			
粉质黏土	1.4	18.5			
淤泥质粉质黏土	2.9	17.3			
淤泥质黏土	3.2	16.9			
淤泥质黏土	2.2	16.9	12	13	0.54
黏土	10.3	17.8	14	16.3	0.54

基坑开挖深度  $H = 10 \text{ m}$ , 开挖宽度  $B > 2.5 H$ , 此基坑为宽基坑。最大计算深度  $h_r$  为 12.5 m, 残余应力系数  $\alpha = 0.3 + 0.0038 h^2 (0 \leq h \leq h_r)$ 。初始卸荷模量系数  $E(-)_{ui}$  取 125.5, 破坏比  $R_f$  取 0.89。淤泥质粘土回弹指数  $C_s$  取 0.42, 粘土取 0.0313, 初始孔隙比  $e_2$  为 1.0, 修正系数  $\phi$  取 1.0。

用残余应力法、自重应力抵消法和超固结比法计算此基坑回弹量分别为 79.61、25.20 mm 和

## 2.3 上海虹桥枢纽西交广场基坑工程

上海西交通广场基坑工程<sup>[18]</sup> 开挖长为 699 m, 宽为 199 m, 基坑不同区域开挖深度不同, 主要开挖深度有 10、21 m 和 29 m, 本案例仅对  $H = 10 \text{ m}$  的基坑进行分析, 工程地质相关参数如表 6 所示。

53.67 mm, 此案例无实测回弹数据, 仅供三种方法之间对比分析, 计算影响深度分别为 12.5、10 m 和 12 m。

## 2.4 地铁一号线徐家汇车站

徐家汇地铁车站基坑<sup>[4]</sup> 呈长条形布置, 开挖长度为 600 m, 宽为 22 m, 深度达 17 m, 支护结构采用 80 cm 厚地下连续墙, 设 5 道支撑, 该工程地质相关参数如表 7 所示。

表 7 案例 4 工程地质相关参数

土层名称	层厚 $h/\text{m}$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	静止侧压力系数 $K_0$
褐黄色粉质粘土	3.1	19.0	16.8	12.5	
灰色淤泥质粉质粘土	3.6	17.9	11.7	9.8	
灰色淤泥质粘土	8.5	17.1	10.7	6.5	
灰色粘土	15.5	17.9	15.7	8.7	0.65

基坑开挖深度  $H = 17 \text{ m}$ , 开挖宽度  $B < 2.5 H$ , 此基坑为窄基坑。最大计算深度  $h_r$  为 13.8 m, 残余应力系数  $\alpha = 0.3 + 0.0034 H^2 (0 \leq h \leq h_r)$ , 初始卸荷模量系数  $\overline{E_{ui}}$  为 125.5, 破坏比  $R_f$  为 0.89, 回弹指数  $C_s$  对灰色淤泥质粘土和灰色粘土均取 0.0313, 初始孔隙比  $e_2$  为 1.0, 修正系数取 2.0。

用残余应力法、自重应力抵消法和超固结比法

计算基坑回弹量分别为 136.29、65.67 mm 和 133.86 mm, 实测最大回弹量 120 ~ 130 mm, 影响深度分别为 13.8、14 m 和 20 m。

## 2.5 上海某高层建筑基坑

上海某高层建筑基坑工程<sup>[4]</sup> 位于上海市东北区, 基坑开挖长度为 38.70 m, 宽度为 61.45 m, 深度为 7.6 m, 支护结构采用 6.4 m 的钢板桩支护。该工程地质相关参数如表 8 所示。

表 8 案例 5 工程地质相关参数

土层名称	层厚 $h/\text{m}$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	静止侧压力系数 $K_0$
褐黄色粉质粘土	1.9	19.5	30	24.7	
灰色砂质粉土	11.6	18.6	26	25.3	0.38
灰色淤泥质粘土	6.2	17.5	15	8.6	0.65

基坑开挖深度  $H = 7.6 \text{ m}$ , 开挖宽度  $B > 2.5 H$ , 故为宽基坑。最大计算深度  $h_r$  为 11.6 m, 残余应力

系数  $\alpha = 0.3 + 0.00483 h^2 (0 \leq h \leq h_r)$ , 初始卸荷模量系数  $\overline{E_{ui}}$  为 250, 破坏比  $R_f$  为 0.89。灰色砂质粉土取

回弹指数  $C_s$  为 0.03, 对灰色淤泥质粘土取回弹指数  $C_s$  为 0.0313, 初始孔隙比  $e_2$  为 1.0, 修正系数取 1.0。

用残余应力法、自重应力抵消法和超固结比法计算此基坑的回弹量分别为 36.02、16.41 mm 和 19.20 mm, 而实测回弹量为 20.2 mm, 计算影响深度分别为 11.6、9.9 m 和 10 m。

表9 工程实例回弹数据分析结果

工程实例 名称	残余应力法		自重应力抵消法		超固结比法		实测 回弹值/mm
	总回弹量/mm	相对误差/%	总回弹量/mm	相对误差/%	总回弹量/mm	相对误差/%	
实例1	66.97	63.34	32.89	-19.77	62.44	52.29	36~46取41
实例2	124.00	20.39	59.79	-41.95	97.68	-5.17	103.00
实例3	73.7.0	22.40	25.20	-58.15	53.67	-10.87	取平均值50.86
实例4	136.29	9.03	65.67	-47.46	133.86	7.09	120~130 取125.00
实例5	36.02	78.30	16.41	-18.77	19.20	-4.97	20.20

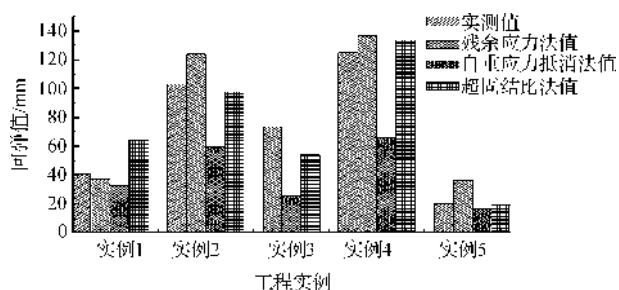


图3 工程实例计算结果与实测值的柱状

从图3可以看出,残余应力法计算结果较实测值偏大,自重应力抵消法计算结果较实测值偏小,而超固结比法的计算结果介于残余应力法和自重应力抵消法之间。在实例1中,残余应力法和超固结比法的计算结果都明显偏大,结合工程实际情况可知此基坑开挖较深,保护等级高,在设计和施工过程中会对坑底进行加固处理,且理论计算并未考虑降水,时空效应等因素,因此导致计算结果偏大。

### 3.2 理论分析

从计算结果来看,超固结比法在计算精度上优于残余应力法和自重应力抵消法,对此可从理论上分析:残余应力法在修正偏大的卸荷应力时,利用经验公式,对于粘土  $\alpha_0 = 0.3$ ,也就是坑底的初始残余应力  $\Delta P' \geq 0.3P_0$ ,随着土层的加深,残余应力逐渐增大。自重应力抵消法利用土体的有效自重来修正偏大的残余应力,尽管没有给出具体的初始残余应力系数值,但是根据卸荷应力即为卸去土体的有效自重,可知坑底土层的初始残余应力  $\Delta P' \geq 0.5P_0$ 。超固结比法利用卸荷过程中静止侧压力系数  $K_0$  的

## 3 结果分析

### 3.1 数据分析

将以上5个工程实例回弹量的计算结果和实测数据分别用如表9和图3所示。

变化来反映初始残余应力,且对每层土体都会有一个不同的初始残余应力值,通过以上图表可知初始残余应力介于  $0.3P_0$  与  $0.5P_0$  之间,因此回弹应力值也会介于残余应力法和自重应力抵消法之间。从回弹模量上来看,超固结比法沿用残余应力法的回弹模量,公式虽然复杂,但考虑了应力路径对回弹模量的影响,使计算更加精确。由于同一土层在不同应力作用下的回弹模量不同,自重应力抵消法用同一值来确定回弹模量,有欠合理。

从影响深度上分析,它直接决定了计算深度,在实例分析中有效的预估影响深度可以对强回弹区进行加固处理,确保基坑的稳定。通过对以上5个实例的计算影响深度进行分析整理,其与开挖深度的关系如图4所示。文献[19]通过试验得出坑底影响区深度与开挖深度成1.33倍正比关系,而超固结比法计算结果与图中的基准线最接近。

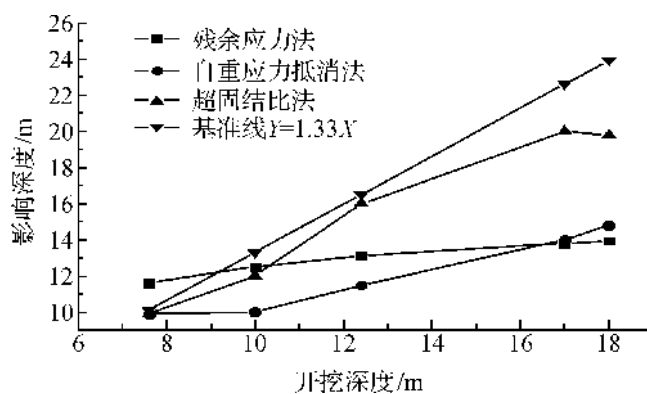


图4 开挖深度与影响深度关系

### 3.3 综合分析

残余应力法的残余应力公式缺乏合理的理论推导,而回弹模量充分考虑了土体应力路径和三向应力状态,能准确反映土体在卸荷过程中的物理力学性质。残余应力法应力计算结果较实测值偏大,因此残余应力计算公式应进行适当修正,使其更加接近实测值。

对自重应力抵消法,其残余应力计算仅涉及土体有效重度  $\gamma'$  一个参数,而事实上残余应力与很多因素有关<sup>[15]</sup>。在计算宽基坑和窄基坑时,使用修正系数  $\varphi$  进行修正,对于长条形基坑取 2.0,修正值比较笼统,考虑到基坑的宽窄不同应力路径也不同<sup>[10-13]</sup>,土体应力应分别计算。且土体的回弹模量随着卸荷的进行而动态的变化,同一土层应分层计算。因此自重应力抵消法的回弹模量计算公式应该进行适当的调整,使得计算结果更精确。

对超固结比法,其残余应力的计算充分利用了开挖卸荷过程中超固结比与静止侧压力系数联动变化关系,并结合土层的有效自重应力即为该层残余应力的思想,逐层求解。总体上融合上述两种方法的核心思想,从不同角度解析残余应力计算公式并与已有的回弹模量计算公式进行组合,得出一种新的,精度更高的回弹变形预测方法。

## 4 结 论

论文在前人方法的基础上,对基坑开挖卸荷应力和残余应力计算进行修正,提出了预测坑底回弹量的超固结比法,经实测案例验证,预测效果良好,主要结论如下:

a) 超固结比法从基坑卸荷过程中超固结比与静止侧压力系数的联动变化关系的角度解析残余应力计算公式,并与残余应力法的回弹模量计算公式进行组合,该组合的计算精度更高。

b) 超固结比法修正的卸荷应力值介于残余应力法和自重应力抵消法之间,从计算结果来看,其修正卸荷应力可更好反应土体的应力状态。

c) 已有试验研究表明,基坑卸荷影响深度值约等于 1.33 倍开挖深度,3 种预测方法中,超固结比法确定的卸荷影响深度与试验结果最接近。

考虑到基坑回弹量与降水、时间效应、空间效应、周围环境、施工条件等诸多因素有关,将来,本文方法尚需针对这些因素做更深入研究。

### 参考文献:

- [1] 苟尧泊,俞峰,杨予. 基坑开挖引起既有桩基侧摩阻力中性点位置分析[J]. 岩土力学,2015,36(9):2681-2687.
- [2] 李平,杨挺,王义. 基坑工程隆起变形研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(2):196-201.
- [3] 杨建民,李嘉. 基坑底分层回弹量的实用计算方法[J]. 岩土力学,2014,35(5):1413-1420.
- [4] 刘国彬,候学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. 设计与施工,1996(2):2-7.
- [5] 李德宁,楼晓明,杨敏. 基坑回弹变形计算方法研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(9):1921-1927.
- [6] 李德宁,楼晓明,杨敏. 上海地区基坑开挖卸荷土体回弹变形试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(S2):244-249.
- [7] 汪中卫,刘国彬. 基于超固结比与变形的基坑被动区土压力计算[J]. 建筑结构,2005,35(9):88-91.
- [8] 袁静,龚晓南. 基坑开挖过程中软土性状若干问题的分析[J]. 浙江大学学报,2001,35(5):465-470.
- [9] 孙永,周顺华,庄丽. 考虑残余应力的基坑被动区土压力及强度计算[J]. 土木工程学报,2011,44(7):94-99.
- [10] 汪中卫,刘国彬. 基于超固结比与变形的基坑被动区土压力计算[J]. 建筑结构,2005,35(9):88-91.
- [11] 刘国彬,候学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报,1996,18(6):18-23.
- [12] 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,2008,3:52-55.
- [13] 贾坚,谢小林. 上海软土地区深大基坑卸荷变形机理[J]. 上海交通大学学报,2009,43(6):1005-1010.
- [14] 楼晓明,李德宁,杨敏. 上海地区基坑底部粉质黏土回弹变形参数分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,40(4):535-540.
- [15] 田振,顾倩燕. 大直径圆形深基坑坑底回弹问题研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(s):1360-1364.
- [16] 魏道琛,胡中雄. 上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,1980,2(4):13-22.
- [17] 刘国彬. 软土卸荷变形特性的试验研究[D]. 上海:同济大学,1993.
- [18] 孔令荣. 考虑残余应力的基坑回弹变形分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(S1):79-82.
- [19] 潘林有,程玉梅,胡中雄. 卸荷应力状态下粘性土强度特性试验研究[J]. 岩土力学,2001,22(4):490-493.

## Methods for Predicting the Rebound Deformation of Foundation Pit in Soft Soil Area

*XIE Zhengbing, YU Feng, GOU Yaobo, LIU Nianwu*

(Institute of Foundation and Structure Technologies, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The unloading process of excavation of foundation pit results in the rebound of soil layer at the bottom of pit. It may impose significant impact on the stability of foundation pit as well as existing engineering piles. Current prediction methods for such rebound include the residual stress method, the self-weight-stress offset method and so on. Based on these methods, a new method for predicting rebound deformation of foundation pit was proposed in this study. This method considered the interactive effect between the over-consolidation ratio and the coefficient of lateral static pressure during excavation and unloading. The initial residual stress in each soil layer was derived so as to modify the over-predicted unloading stress. Then the effective gravity stress was used as residual stress. The resilient modulus of soil was calculated in accordance to the residual stress method. Comparative analyses involving five engineering cases show that the calculating result of the proposed method is consistent with the measured result and the over-consolidation ratio can reflect the variation of unloading stress.

**Key words:** excavation of foundation pit; unloading rebound; residual stress; over-consolidation ratio

(责任编辑: 唐志荣)