

# 软粘土地基基坑开挖性状的研究

曾国熙 潘秋元 胡一峰

(浙江大学土木系, 杭州)

## 提 要

本文发展了一个可用于分析以板桩为支挡结构的软粘土地基基坑开挖问题的有限元程序。用杭州友好饭店工地的饱和软粘土样进行了四种不同应力路径等向固结不排水剪(CIU)试验,结果表明,归一化初始切线模数 $E_t$ 与本文提出的应力路径参数 $\alpha$ 成良好的直线关系。并根据试验结果建立了相应的模量方程。利用有限元程序对影响基坑性状及工程经济效益的几个重要因素(诸如板桩的插入深度、板桩的刚度以及土质条件等)进行了探讨,得出了一些有实用意义的结论。最后分析了杭州友好饭店基坑开挖工程实例,理论计算与实测值比较,是令人满意的。

## 一、引 言

随着城市建设的发展,由于地基开挖引起的一系列问题亟待解决。虽然许多研究者在这方面做了很多工作并取得了许多有价值的成果。如波兰特(Burland)等,1979<sup>[1]</sup>;辛普森(Simpson)等,1979<sup>[2]</sup>;波茨,福里(Potts, Fourie),1984<sup>[3]</sup>。但是对软粘土地基基坑开挖性状的认识还有待于进一步研究。

本文首先在室内试验的基础上探讨了饱和软粘土应力-应变关系受应力路径影响的特性,随后将研究成果应用于基坑开挖的有限元分析中。同时利用程序研究了板桩插入深度和刚度、支撑刚度等因素对基坑性状的影响。最后分析了杭州友好饭店基坑开挖工程实例。

## 二、考虑应力路径影响的非线性模量方程

软粘土的应力-应变关系不但具有非线性特点而且受应力路径的影响。基坑开挖过程土体中各点的应力路径是变化的,分析时不可能全面加以考虑。但是,抓住几种主要的应力路径做适量的室内试验以模拟现场施工条件是很有必要的。本文考虑了如图1所示的两种应力路径并推导了相应的模量方程。为了方便,定义变形模量 $E_d$ 如下:

$$E_d = \frac{\Delta\sigma_a - \Delta\sigma_h}{\Delta\varepsilon_a} \quad (1)$$

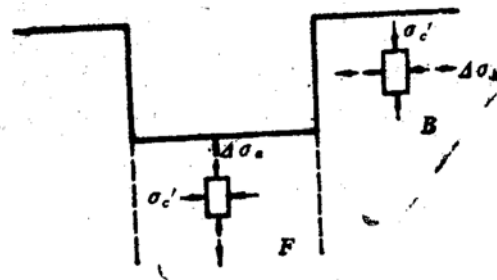


图1 基坑开挖过程中典型的应力路径

式中  $\varepsilon_a$  为三轴试验试件的竖向应变;  $\sigma_a$ ,  $\sigma_h$  分别为竖向及水平向总应力。

根据增量弹性理论以及常规三轴试验中的应力条件, 切线杨氏模量  $E_t$  与应力增量、应变增量的关系可以表示为

$$E_t = \frac{(\Delta\sigma_a + 2\Delta\sigma_h)(\Delta\sigma_a - \Delta\sigma_h)}{\Delta\sigma_h(\Delta\varepsilon_a - 2\Delta\varepsilon_h) + \Delta\sigma_a\Delta\varepsilon_a} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_h$  为三轴试验试件的水平向应变。

在图 1 的应力  $F$  路径条件下, 式(2)可简化为

$$E_t = E_d \quad (3a)$$

在应力路径  $B$  条件下, 式(2)可简化为

$$E_t = 2\nu_t E_d \quad (3b)$$

式中  $\nu_t$  为切线泊松比。

大量的试验表明正常固结饱和粘土的应力-应变曲线可以按双曲线函数加以拟合(康纳(Kondner), 1963<sup>[4]</sup>)并且可以按某些参数加以归一(Zeng和Gong, 1985<sup>[5]</sup>), 因此式(3a)和(3b)可以进一步改写为

$$E_t = \bar{E}_i \sigma_c' (1 - R_f S)^2 \quad (4a)$$

$$E_t = 2\nu_t \bar{E}_i \sigma_c' (1 - R_f S)^2 \quad (4b)$$

式中  $\bar{E}_i$  为归一化应力-应变曲线的初始切线斜率;  $S$  为剪应力水平;  $R_f$  为破坏比率。

在不排水条件下,  $\nu_t = 0.5$ , 这时式(4b)就与式(4a)具有相同的型式。但必须指出, 采用的参数值( $\bar{E}_i$ 和 $R_f$ )应按相应路径条件试验加以测定。

一般来说, 应力路径三轴试验可在应力式三轴仪上进行。室压由水银柱提供, 轴压的大小由砝码控制, 竖向卸载可由导杆—钢丝绳—滑轮系统实现。每级剪应力增量值小于预估强度的10%。

### 三、杭州正常固结饱和粘土CIU试验成果

图 2 表示杭州正常固结饱和粘土( $w = 41.5\%$ ,  $G = 2.73$ ,  $e = 1.13$ ,  $w_L = 37.5\%$ ,  $w_P = 18.5\%$ ,  $I_P = 19.0$ )沿着图示四条总应力路径固结不排水剪(CIU)试验, 按固结压力  $\sigma_c'$  归一化的应力-应变曲线。

数值分析中对计算结果影响最大的参数之一是初始切线模数  $\bar{E}_i$ , 它是归一化应力应变曲线的初始切线斜率(Zeng, 1980<sup>[6]</sup>; Zeng和Gong, 1985<sup>[5]</sup>)。图 3 表示杭州粘土的  $\bar{E}_i$  与应力路径参数  $\alpha$  的关系, 其中  $\alpha$  定义如下:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta\sigma_a + \Delta\sigma_h}{\Delta\sigma_a - \Delta\sigma_h} \quad (5)$$

从图 3 中可见, 在所进行的四种应力路径试验中,  $\bar{E}_i$  与  $\alpha$  成良好的直线关系。而且从  $\bar{E}_i$  随  $\alpha$  变化的数值看, 应力路径对  $\bar{E}_i$  的影响是显著的。

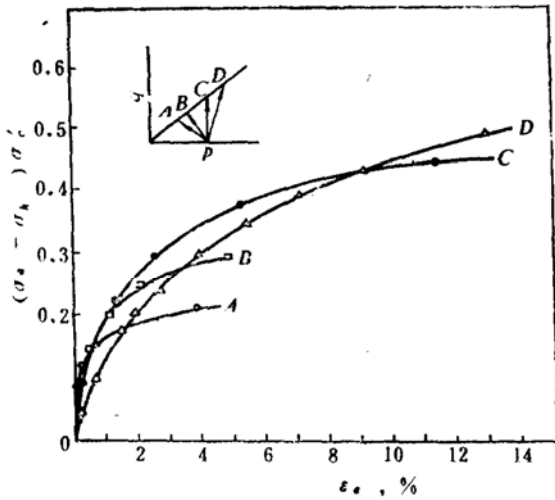


图2 四种应力路径归一化应力应变曲线

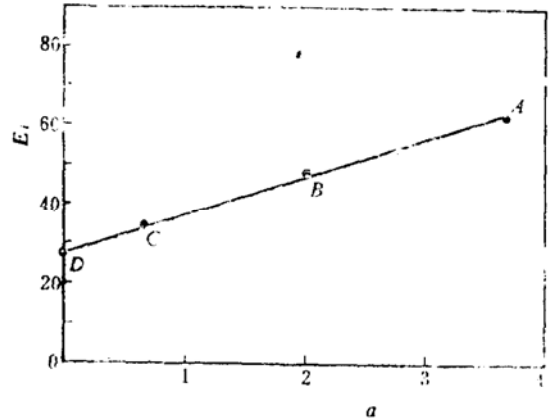


图3 四种应力路径的  $\bar{E}_s$  与  $a$  关系

### 四、有限元分析的模式

#### (一) 基本假设

1. 按平面应变问题考虑，利用对称性取半截面分析，几何及边界条件如图4所示。
2. 土体的初始应力按静止土压力估算，开挖以前打桩引起的土体原位应力和性状的变化不予考虑。
3. 基坑开挖通常属于临时性设施，故按不排水条件分析，泊松比取为0.49。
4. 开挖过程按分步增量法模拟，每个单元的初始杨氏模量根据初始应力计算，随后根据应力状态的变化再作相应调整。
5. 土单元采用八结点等参元，板桩抽象为弹性梁单元，分析中没有考虑土与板桩之间可能发生的脱离和滑动。

#### (二) 开挖荷载的计算

本文采用马纳(Mana, 1976)<sup>[1]</sup>提出的方法计算每一阶段的开挖荷载。计算式如下：

$$\{F\} = \sum_{m=1}^M \int_V [B]^T \{\sigma\} dV \quad (6)$$

式中  $M$  为某阶段将被挖去的单元数，这些单元与未开挖单元有公共边界； $[B]$  为应变矩阵； $\{\sigma\}$  为单元应力矢量。

根据上述基本假设和计算式，本文研制了一个用 FORTRAN 语言编写的有限元程序，适用于临时性基坑开挖分析。

### 五、顶部加支撑板桩墙的数值结果

本节列出了顶部加支撑的板桩墙的侧向位移和弯矩受板桩刚度和插入深度等因素影响的

数值结果。计算的几何边界条件如图4所示。开挖深度假设为6 m,分三个阶段进行。计算用的参数列于表1。表中 $\bar{E}_i$ 为土变形参数,见方程(4); $EI$ 为板墙刚度; $\bar{K}$ 为支撑刚度; $D$ 为插入深度; $\gamma = 15.0 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 0$ ,  $\varphi = 30^\circ$

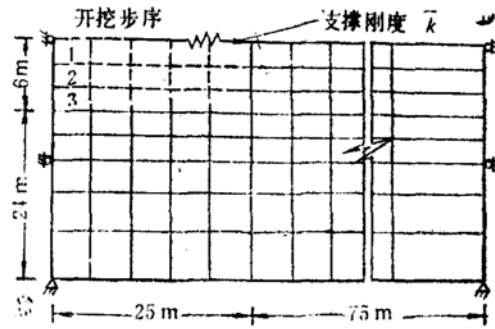


图4 分析中的几何及边界条件

表1

有限元分析参数

算例	$\bar{E}_i$	$EI$	$\bar{K}$	$D$
1*	$\bar{E}_{ir}$	$(EI)_r$	$\bar{K}_r$	$D_r$
2	$\bar{E}_{ir}$	$(EI)_r$	$\bar{K}_r$	$0.75D_r$
3	$\bar{E}_{ir}$	$(EI)_r$	$\bar{K}_r$	$1.25D_r$
4	$\bar{E}_{ir}$	$0.5(EI)_r$	$\bar{K}_r$	$D_r$
5	$\bar{E}_{ir}$	$8(EI)_r$	$\bar{K}_r$	$D_r$
6	$\bar{E}_{ir}$	$(EI)_r$	$0.5\bar{K}_r$	$D_r$
7	$\bar{E}_{ir}$	$(EI)_r$	$2\bar{K}_r$	$D_r$
8	$2\bar{E}_{ir}$	$(EI)_r$	$\bar{K}_r$	$D_r$

表中参考算例如下(有\*者):

$$\bar{E}_{ir} = 150.0, \quad D_r = 8.0 \text{ m}, \quad \bar{K}_r = 2.5 \times 10^3 \text{ kN/m}, \quad (EI)_r = 4.0 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2.$$

八个算例结果讨论如下:

[算例1](图5) 本算例是为以后比较设置的参考算例。三个阶段板桩侧向位移、弯矩分布及最终土压力分布的计算结果如图5所示。

[算例2和算例3](图6) 这两个算例板桩的插入深度分别为6.0 m和10.0 m,其它计算参数数值相同。可见这两个算例虽然插入深度不同,但在公共部分侧向位移和弯矩没有明显差别。可以推测,如果板桩插入深度满足最小值的要求(本例约为4.0 m)企图以增加板桩插入深度来减小侧向位移是徒劳的。

[算例4和算例5](图7) 这两个算例的结果可以说明板桩刚度对其侧向位移和弯矩的影响。算例5板桩刚度为算例4的16倍。算例4的最大弯矩约为120 kN·m,而算例5则为260 kN·m,最大侧向位移只减少了约2 cm。因此,增加板桩刚度只能一定程度地控制侧向位移,但由此将引起弯矩的显著增加。

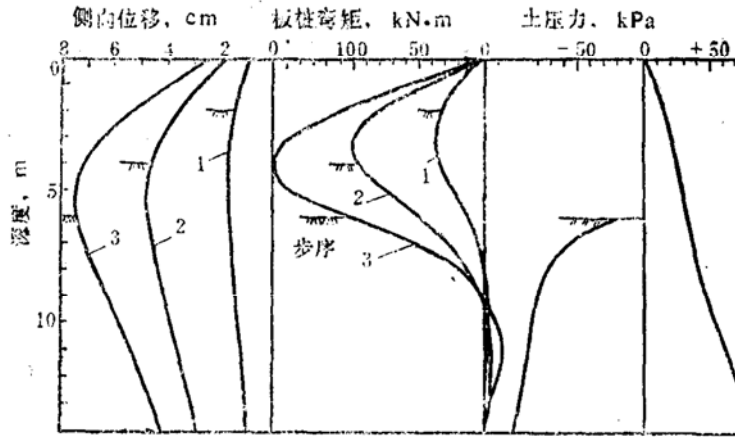


图5 算例1的计算结果

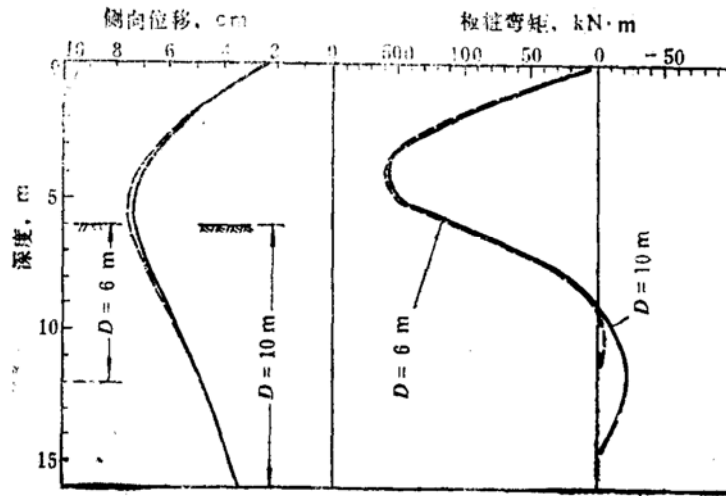


图6 插入深度对板桩侧向位移和弯矩的影响

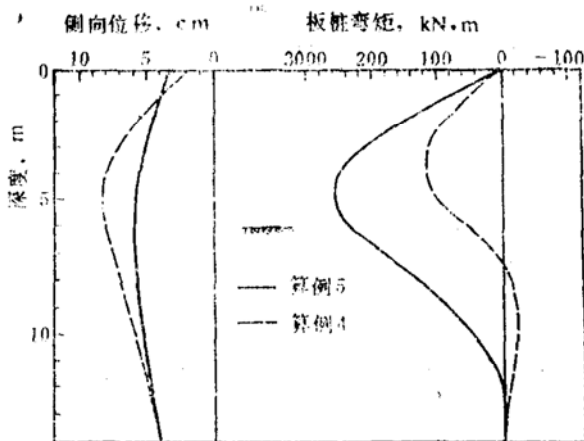


图7 板桩刚度对侧向位移和弯矩的影响

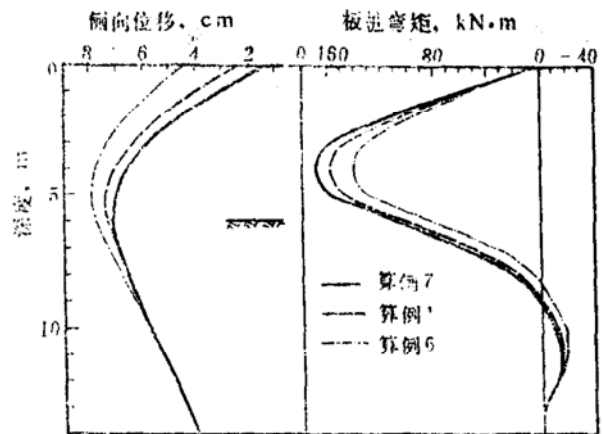


图8 支撑刚度对侧向位移和弯矩的影响

进一步的计算表明，以上几点结论对悬臂式、多道支撑式板桩墙也是成立的。

[算例6和算例7](图8) 分析这两个算例的目的是为了观察顶部支撑刚度变化对结果的影响。算例7，算例1，算例6的支撑刚度各相差一倍。图8是三个算例的结果。显然，增加顶部支撑刚度对于减小板桩上部侧向位移效果是显著的，但对插入部分作用不大。

[算例 8](图 9) 本算例计算参数除土的初始切线模数 $\bar{E}_t$ 为算例 1 的一倍外, 其余参数与算例 1 相同。图 9 表示计算的结果, 结论是土刚度增大使板桩的侧向位移和弯矩值减小, 这与工程实践的结论是一致的。

归纳以上的分析可以得出这样的结论: 为了使基坑开挖达到技术上和经济上的最优选择, 合理地选取板桩插入深度和刚度是非常重要的。

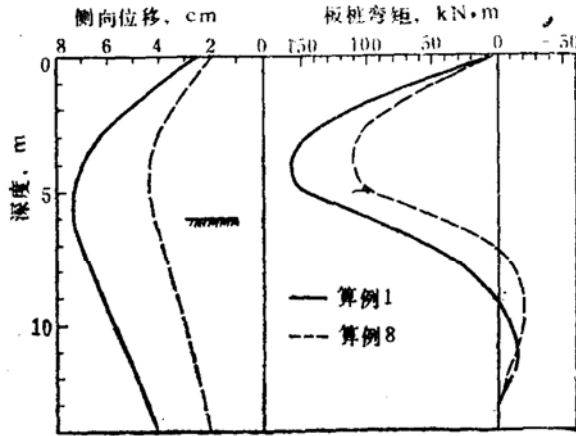


图 9 土刚度对侧向位移和弯矩的影响

### 六、工程实例分析

杭州市于1985年筹建的友好饭店现已完工, 总高为66m, 现场离西湖约300m。根据设计, 地基开挖深度为7m, 开挖区平面尺寸为30×60m。现场平面见图10, 基坑三面紧靠三条闹市区的街道。另一面紧靠一幢五层民房, 最近处离基坑边缘相距仅2.0m。

根据现实可能性, 基坑由钢板桩加以围护。施工中, 现场的五层民房的稳定是至关重要的, 笔者有幸受邀负责现场的测试及咨询。以下介绍部分实测和分析结果。

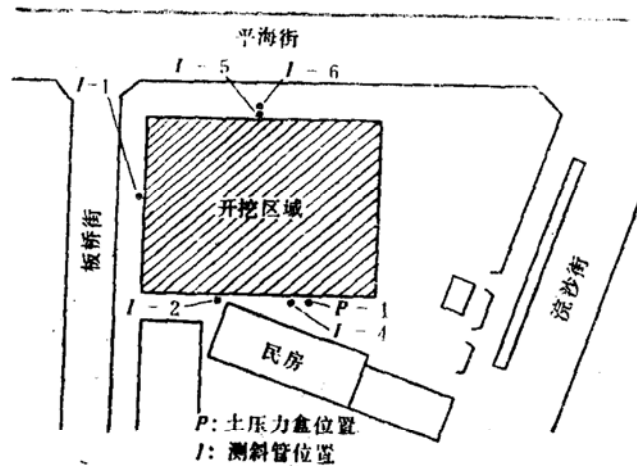


图10 现场平面

### (一) 土质条件和现场仪器埋设

现场土层属滨海湖相沉积，大致可分为四层，基本物理力学参数列于表2。第四层以下为风化岩石，计算时假设其位移为零。

现场一共布置了六根测斜管，长19.0—20.0m，具体位置见图10。现场测斜仪采用美国测斜仪公司的P/N50325型探头及显示器。此外在邻近孔-4处布置了5个土压力盒。

表2 土的基本物理力学性质

层数	深度 (m)	容重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比 $e$	界限含水量		塑性指数 $I_P$	十字板 强度 $\tau_f$ (kPa)
				$w_L$ (%)	$w_P$ (%)		
	0						
1	4.5	18.6	—	—	—	—	37.6
2	15.1	17.6	1.13	37.5	18.5	19.0	24.0
3	27.3	19.1	0.76	41.0	20.6	20.4	50.0
4	34.6	15.9	1.48	48.6	37.0	11.6	—

### (二) 计算与实测结果

图11是I-5离地面6.0m处侧向位移随开挖发展的实测资料。从图中可见开挖完成后约5天，侧向位移趋于稳定，土压力的变化亦有类似性状。本文采用的各项实测数据均为开挖完成五天后的资料。

孔-1, 4, 5, 6侧向位移的实测值和计算值绘于图12(深度0指板桩顶部)。从图中可见孔-1, 5, 6的结果是令人满意的。而孔-4的实测值明显大于计算值，这是由于孔-4离民房较近，而计算没有计及该楼传来的荷载。

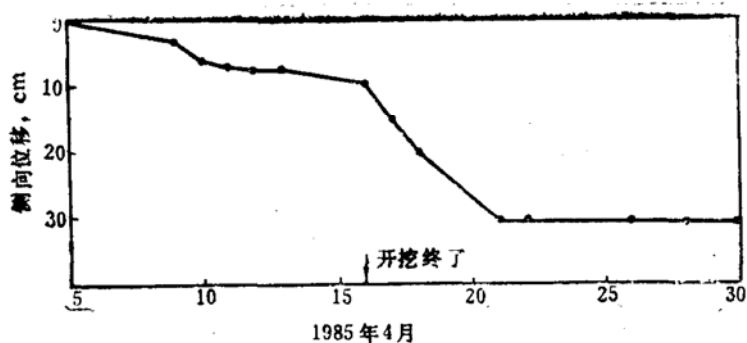


图11 某点实测的侧向位移-时间关系

由于时间仓促现场来不及布置板桩墙背后地面沉降观察仪。图13是有限元计算的结果，最大沉降发生在离墙背约1.0m处。

墙背土压力观察的结果与计算值接近的程度是令人满意的(图14)。靠近上部实测值小于计算值可能是由于靠近地面土体受施工扰动影响引起的。

最后，计算给出了该工程实例破坏区发展的程度(图15)。破坏方式分别为剪切破坏和张

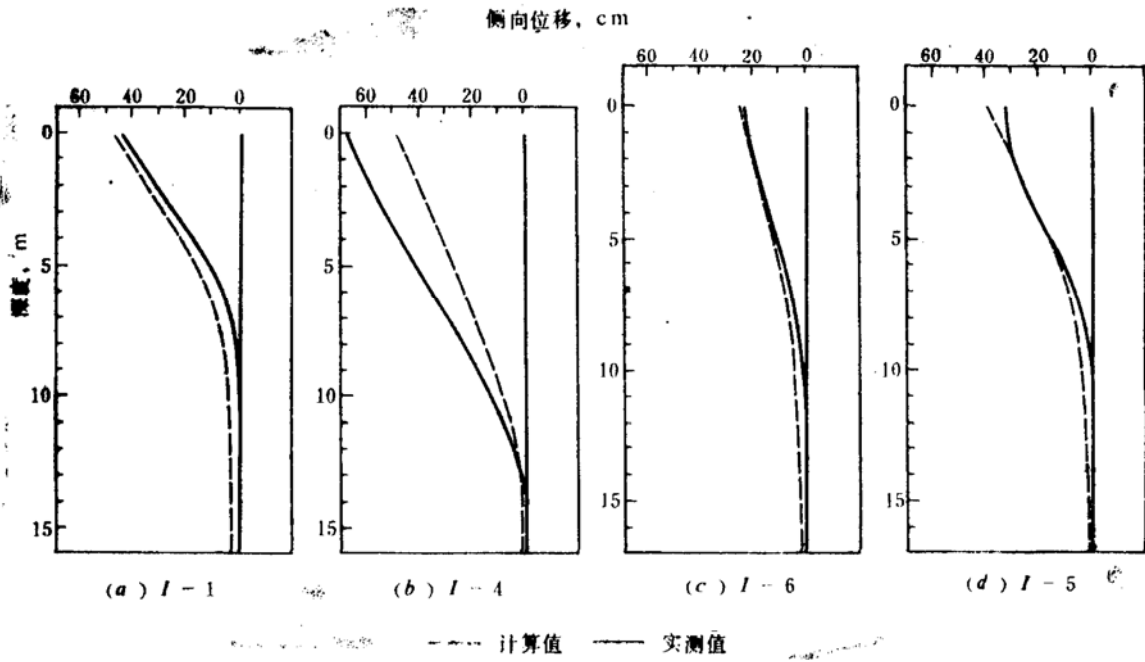


图12 计算和实测的侧向位移



图13 计算的墙后沉降

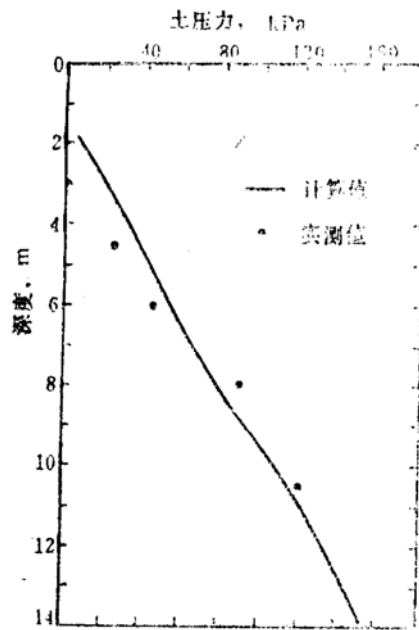


图14 计算和实测土压力值(I-4)



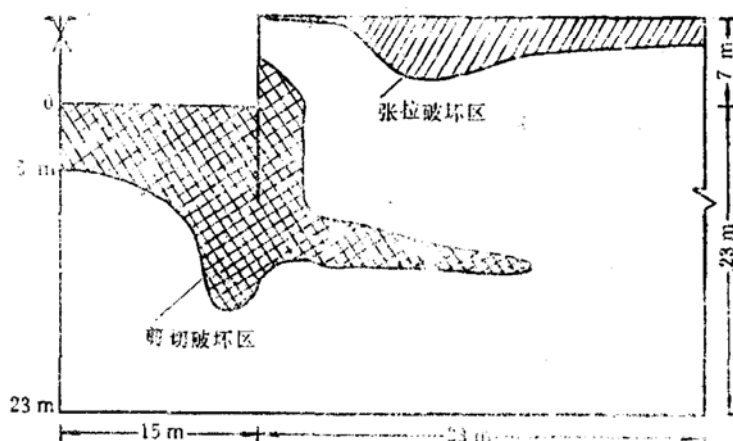


图15 预估的破坏区

拉破坏。现场观察到的基坑外地面裂缝发生范围与预估范围基本一致。应该指出，预估的破坏区范围与计算模型、选用的破坏准则和参数等因素有关，它不可能完全符合实际情况，但可以反映出基本的规律，可以为工程上解决有关问题提供依据。

## 七、结 论

1. 杭州正常固结饱和粘土按四种不同的应力路径三轴固结不排水剪试验结果表明，归一化应力-应变曲线的初始切线斜率(初始切线模数 $\bar{E}_t$ )与应力路径参数 $\alpha$ 呈良好的直线关系(图3)。

2. 本文推导了两种不同应力路径条件的模量方程。在不排水条件下，它们具有相同的型式，但其参数值应根据相应的应力路径试验予以测定。

3. 基坑开挖的有限元分析结果表明，当板桩的插入深度满足最小值要求时，继续增加插入深度对于减小侧向位移几乎没有效果。增加板桩刚度能一定程度地减小侧向位移，但相应增加了板桩弯矩。增加顶部支撑刚度能有效地减小板桩上部侧向位移，但对插入部分影响不大。土的刚度对侧向位移及板桩弯矩有明显的影响。

4. 本文还分析了杭州友好饭店基坑开挖工程实例。计算的土体侧向位移和土压力值同实测值比较的结果是相当接近的。计算预估了两个破坏区(剪切破坏区，张拉破坏区)开展的范围。现场观察到的基坑外地面裂缝发生范围落在预估区内。

## 参 考 文 献

- [1] Burland, J.B., Simpson, B., John, H.D. ST., Movements around Excavations in London Clay, Design Parameters in Geotechnical Engineering, BGS, London, Vol. 1, 1979, pp. 13—29.
- [2] Simpson, B., O'riordan, N.J., Croft, D. D., A Computer Model for the Analysis of Ground Movements in London Clay, Geotechnique 29, No. 2, 1979, pp. 149—175.
- [3] Potts, D.M., Fourie, A.B., The Behavior of a Propped Retaining Wall; Results of a Numerical Experiment, Geotechnique 34, No. 3, 1984, pp. 383—404.
- [4] Kondner, R.L. Hyperbolic A stress-strain Response; Cohesive Soils. ASCE J, Soil

- Mech. and Found. Div., No. SM1, 1963, pp. 115—143.
- [5] Zeng, G.X., Gong, X.N., Geotechnical Aspects of Soft Clay Ground under Tanks, Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg. (4), 1985, pp. 2291—2294.
- [6] 曾国熙, 正常固结粘土不排水剪归一化性状, 软土地基学术讨论会论文集, 水利出版社, 1980年, pp.13—26.
- [7] Mana, A.I., Finite Element Analysis of Deep Excavation Behavior, Thesis, Presented in Partial Fulfillment of the Ph.D. Degree, Stanford University, Stanford, California, 1976.
- [8] Duncan, J.M., Chang, C.Y., Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, ASCE. J. Soil Mech. and Found. Div., No. SM5, Vol. 96, 1970, pp. 1629—1653.
- [9] Yudhbir, Varadarajan, A., Stress-path Dependent Deformation Moduli of Clay, ASCE J. Geotech. Div., No. GT3, Vol. 101, 1975, pp. 315—327.

## The Behavior of Excavation in Soft Clay Ground

*Zeng Guexi, Pan Qiuyuan, Hu Yifeng*

(Zhejiang University, Hangzhou)

### Abstract

A calculation programme of finite element method has been developed in order to study the behavior of excavation with sheet piling in soft clay. Based on a series of isotropically consolidated-undrained tests (CIU) on Hangzhou clay a linear relationship between the normalized initial tangent modulus number,  $\bar{E}_i$ , and stress-path parameter,  $\alpha$ , is found for four different stress paths, and stress-path dependent modulus equations derived. Meanwhile, several influence factors, such as embedment depth and stiffness of the wall and soil conditions, were taken into consideration in the programme. Some valuable conclusions were obtained. Finally, a case history was studied by the proposed method of calculation. The result of calculation and the field observation are in good agreement.