

复合型土钉墙的非线性有限元分析

The nonlinear analysis of FEM on composite soil-nailed retaining wall

杨林德¹, 李象范¹, 钟正雄²

(1. 同济大学 地下系, 上海 200092; 2. 南京测绘勘察研究院, 江苏 南京 210005)

摘要: 复合型土钉墙是近年来在沿海软土地区出现的一种新型基坑围护结构, 已得到广泛应用。建立并采用了带转动自由度的 Goodman 单元, 对其进行的非线性有限元分析, 通过与工程实例的对比检验了这一方法的合理性。

关键词: 复合型土钉墙; 基坑支护; 有限元方法; Goodman 单元

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)02-0149-04

作者简介: 杨林德, 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程结构设计与施工技术的研究工作。

YANG Lin-de¹, LI Xiang-fan¹, ZHONG Zheng-xiong²

(1. Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Nanjing Research Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation 210005, China)

Abstract: A kind of new composite soil-nailed retaining wall, composed of soil, soil nail and soil-mixed cement, has been suggested and widely used in Shanghai recent years. It is a new kind of support form of foundation pit and successfully applied in the loose or saturated soft soil. This paper studies the action mechanism of the technique. The FEM is employed and a kind of rotational Goodman interface element is proposed to simulate the behavior of interface between the soil-mixed cement, which forms the barrier of seepage flow along the boundary of foundation pit, and soil ground. The calculated values of displacements are compared with the data measured in situ. The results show that they match with each other very well, and that this kind of analytical method is rational and applicable for case study.

Key words: composite soil-nailed retaining wall; foundation pit; rotational Goodman interface element; nonlinear analysis of FEM

1 引言^y

土钉墙是一类经济、可靠和安全的支护形式, 但在松散砂土、软粘土及地下水丰富的地层中应用时, 常因地层不能对土钉提供足够的抗拔力而难于采用^[1,2]。尤其是在饱和含水地层中, 土体含水常使地层进一步软化, 不仅导致自支承能力变得更差, 而且难于形成喷射面。因此在土层较软弱地区, 土钉支护的应用受到了较大的限制。

在上海地区, 地下工程涉及的地层主要是饱和含水的淤泥质地层, 同时伴有水平成层, 在开挖过程中易于产生流砂现象的薄层粉、细砂。由此使在上海地区对基坑工程采用土钉墙技术形成围护遇到较大的技术难题。同济大学对此结合工程实践进行了研究, 并提出了“复合型土钉墙”支护技术, 成功地解决了此难题。此技术的特点是: 在基坑开挖前先沿坑周施作密排搅拌桩形成止水帷幕, 施工时通过沿土钉注浆加固地层对软土进行固化改性。此类技术已在华敏中山小区、东方肝胆医院、虹祺花苑等 200 多个基坑工程中获得成功的应用。

2 弹塑性有限元分析

2.1 基本假定

为简化计算, 对数值分析法的建立作以下假定:

①复合土钉墙的计算可简化为二维平面应变问题; ②土钉及其辅助加固材料处于弹性受力状态, 地层土体为弹塑性体。

复合土钉墙加固后的地层土体的力学行为极为复杂^[3,4], 模拟其材料特性时, 屈服条件选为德鲁克-普拉格屈服条件, 其表达式为

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式中 I_1 为主应力张量第一不变量; J_2 为主应力偏量第二不变量; α, k 为常数。平面应变条件下, 将上式与莫尔-库伦公式对比, 可得

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}; k = \frac{\sqrt{3} c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (2)$$

2.2 单元类型与带转动自由度的 Goodman 单元

对地层土体采用四边形等参元离散, 土钉的作用简化为仅承受轴力的一维弹性杆单元, 地层开挖后外露的密排搅拌桩和喷射混凝土面层的组合体的作用简化为弹性梁, 在其与土体的接触面上则设置带转动自由度的 Goodman 单元^[5,6], 用以模拟接触面特性的影响。

带转动自由度的 Goodman 单元形式如图 1 所示^[7,8]。由图 1 可见, 单元长度为 L 、厚度为零、与相邻土体单元和梁单元在结点处位移协调, 靠粘结、滑移

作用发生力的联系。

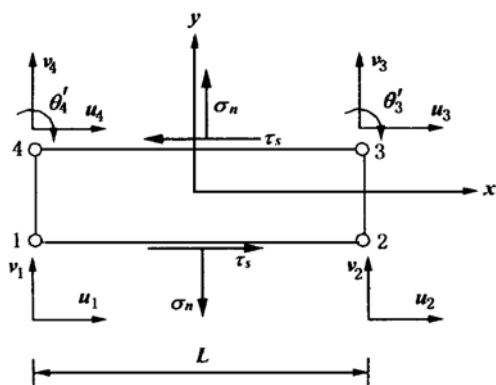


图1 带转动自由度的 Goodman 单元

Fig.1 Rotational Goodman interface element

在结点力 $\mathbf{P}^e$ 作用下, 粘结-滑移接触单元的内应力为

$$\sigma = [\tau_s \quad \sigma_n \quad M_0]^T \quad (3)$$

将单元结点间的切向、法向相对位移及单元两侧的相对转角分别记为 Δu , Δv , $\Delta \theta$, 并对相对转角设定以使接触面发生逆时针向转动为正, 则单元两侧产生的相对位移 ω 为

$$\omega = [\Delta u \quad \Delta v \quad \Delta \theta]^T \quad (4)$$

线弹性假定下, σ 与 ω 间的关系式为

$$\sigma = \mathbf{k}_0 \omega \quad (5)$$

$$\text{式中 } \mathbf{k}_0 = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & k_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 k_s , k_n , k_0 分别为单元材料的切向、法向和弯曲刚度系数, 取 $k_0 = L^3 k_n / 12$ 。

接触面单元内各点的相对位移为

$$\omega = \frac{1}{2} \mathbf{B}_J \delta^e \quad (7)$$

式中

$$\mathbf{B}_J = \begin{bmatrix} A & 0 & B & 0 & -B & 0 & 0 & -A & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 & B & 0 & -B & 0 & 0 & -A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -B & 0 & 0 & -A \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A = 1 + 2x/L; \quad B = 1 - 2x/L \quad (9)$$

$$\delta^e = [u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad \theta_3 \quad u_4 \quad v_4 \quad \theta_4]^T \quad (10)$$

由虚功原理可求得

$$\mathbf{P}^e = \mathbf{K}^e \delta^e \quad (11)$$

$$\text{式中 } \mathbf{K}^e = \frac{t}{4} \int_{-t/2}^{t/2} \mathbf{B}_J^T \mathbf{k}_0 \mathbf{B}_J dx \quad (12)$$

其中 t 为单元宽度, 对平面应变问题常取 $t = 1$ 。

上式为在单元局部坐标系中的表达式。将整体坐

标系与单元局部坐标系间的坐标转换矩阵记为 $\mathbf{T}$, 则整体坐标中的单元刚度矩阵 $\mathbf{K}^e$ 的表达式为

$$\mathbf{K}'^e = \mathbf{T}^T \mathbf{K}^e \mathbf{T} \quad (13)$$

3 计算简图与开挖过程的模拟

采用有限元方法分析时, 计算域的确定和边界条件的设置与常规方法相同, 开挖过程的模拟则需要追踪基坑开挖与土钉支护体系的建造过程^[9]。

对每一级开挖, 有限元分析的计算过程均为先求出开挖面上土体单元的结点力, 据以给出释放荷载, 同时挖除土体单元并增补表示土钉作用的杆单元, 然后计算围护结构和地层的位移场和应力场。各级开挖中的应力及位移的计算式为

$$\sigma_n = \sigma_0 - \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_0 - \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{u}_i \quad (15)$$

式中 σ_n , $\mathbf{u}_n$ 分别为 n 步开挖结束后的应力和位移; σ_0 , $\mathbf{u}_0$ 分别为初始应力和位移, 一般令 $\mathbf{u}_0 = 0$ 。

4 实例分析

上海东方肝胆外科医院新建病房大楼由一 15 层的高层建筑和裙房组成, 裙房基坑挖深 5.4 m, 主楼基坑挖深一般 6.0 m, 局部 7.0 m, 如图 2 所示^[10]。

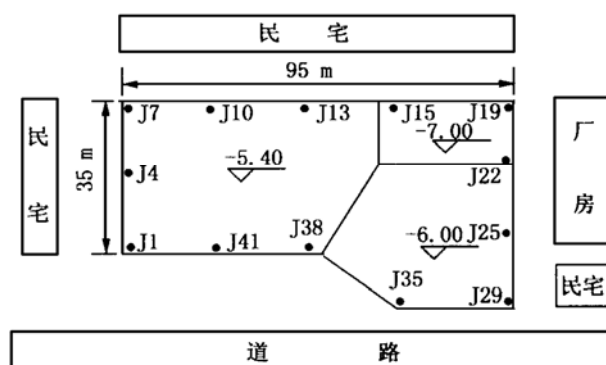


图2 基坑平面形状及测点布置图

Fig.2 The layout of measuring points of a foundation pit

本工程的基坑支护为复合型土钉墙支护。施工时先沿基坑轮廓线设置双排水泥搅拌桩形成止水帷幕, 搅拌桩宽 1.2 m, 深 14.9 m。开挖过程中共设置 6 排土钉, 水平和垂直向间距均为 1 m。第一、二排土钉长 12 m, 第三、四排长 9 m, 第五、六排长 6 m。分 4 步开挖, 第一、四步挖深 1.5 m, 第二、三步挖深 2 m。

计算选用的结构参数为土钉弹性模量 $E_1 = 0.30$, $E_1 = 3 \times 10^7$ MPa, 单钉面积 $A_1 = 0.00785$ m²; 搅拌桩墙弹性模量 $E_M = 100$ MPa, $\mu_M = 0.30$, 每米搅拌

表 1 主要土层物理力学指标计算参数表
Table 1 Mechanical and physical properties of soil strata

土 类	厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	变形模量/MPa	泊松比	凝聚力/kPa	内摩擦角/(°)	静止侧压系数
填土	1.50	1.78	9.00	0.49	15	17	0.49
褐黄色粉质粘土	2.00	1.87	6.00	0.49	14	15	0.51
灰色淤泥质粉粘土	4.50	1.80	5.00	0.49	8	11	0.53
灰色淤泥质粘土	5.00	1.76	15.00	0.49	7	9	0.43
灰色粘土	17.00	1.90	25.00	0.49	17	20	0.40

桩墙面积 $A_M = 1.2 \text{ m}^2$, 接触单元 $k_s = 100 \text{ kN/m}^3$, $k_n = 40000 \text{ kN/m}^3$ 。计算取用的土层参数为上海地区典型土层物理力学指标的平均值, 见表 1。

主要计算结果如下:

(1) 复合型土钉墙的位移

图 3 为分步开挖时搅拌桩墙体的侧向变形曲线, 由图 3 可见起初其变形特征与非复合型土钉墙相似, 以后随着开挖深度的增加, 中下部位水平位移发展较快, 墙体鼓胀, 并向基坑内侧凸出, 发生最大侧向变形的位在坑底附近。其数量规律, 是挖深达 4 m 后侧向变形发展较快, 在挖深达 6 m 前变形量一般小于 5 cm, 达 6 m 后大于 5 cm。

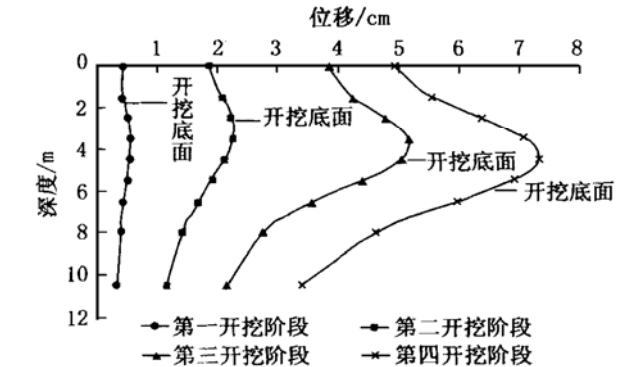


图 3 不同开挖阶段复合型土钉墙水平位移图
Fig. 3 Horizontal displacements of soil-nailed retaining wall in different excavation stage

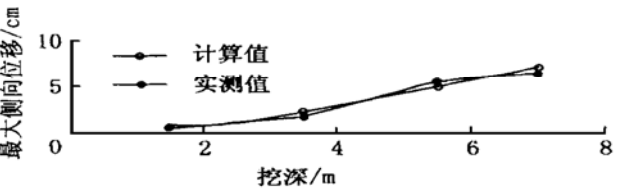


图 4 最大侧向位移计算值与实测值对比图
Fig. 4 Comparison between calculated and measured maximum horizontal displacements

图 4 为实测最大侧向变形值与计算值的对比, 由图 4 可见两者较吻合。

图 5 为分步开挖时地表的沉降曲线。由图 5 可见随着挖深的增加, 地面沉降值和分布范围随之增大, 最大值在基坑外侧约 0.9H 处, 由此形成“沉降槽”。

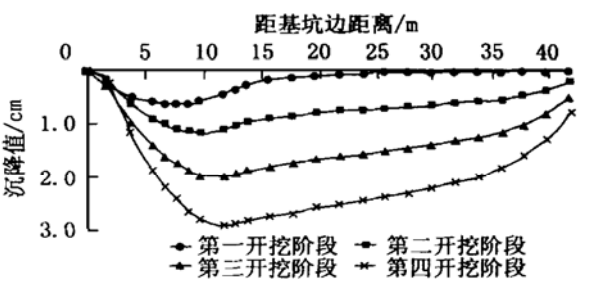


图 5 不同开挖阶段地面沉降图
Fig. 5 Ground settlement near the foundation pit in different excavation stage

(2) 土钉轴力

图 6~ 11 为不同位置处的土钉轴力分布随挖深而变化的情况。由图可见土钉轴力随挖深增大而增大, 沿钉深全长分布不均匀, 最大轴力发生在基坑壁后 1~ 2 m 范围内, 且第二、三和四排土钉的最大轴力高于顶层和底层土钉的最大轴力。图 7 对第二排土钉轴力的计算值与实测值进行了比较, 在第二开挖阶段前半部计算值高于实测值, 在第三、四开挖阶段末端实测值比计算值衰减快, 其余两者均较接近。

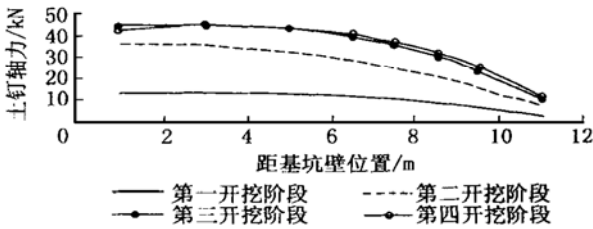


图 6 不同开挖阶段第一排土钉轴力变化图
Fig. 6 Axial force of the first row of soil nail in different excavation stage

(3) 塑性区分布

计算表明, 第一、二开挖阶段没有出现塑性区; 第三步开挖阶段(挖深 5.5 m), 地表开始在局部小范围内出现塑性区; 第四开挖阶段(挖深 7 m), 地表塑性区向后和向深部延伸, 同时坡脚也开始出现塑性区。坡脚塑性区是剪胀屈服的反映, 而地表塑性区则是抗张拉能力不足的后果。其进一步趋势是二者连通, 导致基坑失稳破坏。可见挖深 7.0 m 时这类支护的承载能力已趋近极限。

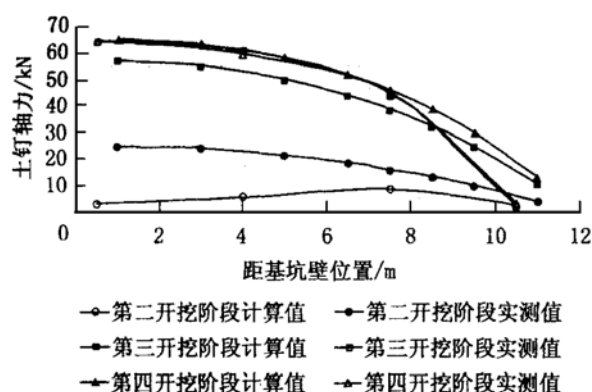


图7 第二排土钉轴力计算与实测值对比图

Fig. 7 Comparison between calculated and measured axial force of the second row soil nail

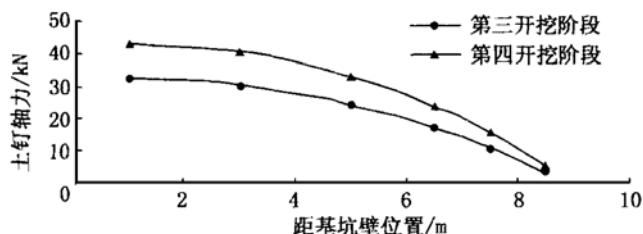


图8 不同开挖阶段第三排土钉轴力变化图

Fig. 8 Axial force of the third row of soil nail in different excavation stage

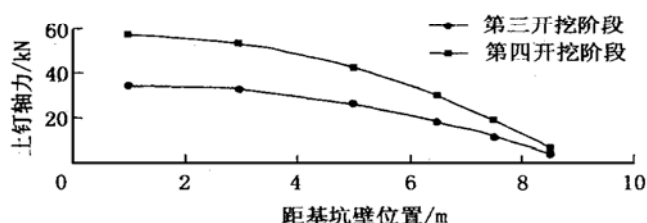


图9 不同开挖阶段第四排土钉轴力变化图

Fig. 9 Axial force of the forth row of soil nail in different excavation stage

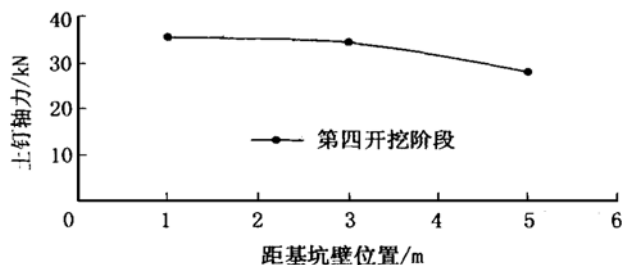


图10 第五排土钉轴力变化图

Fig. 10 Axial force of the fifth row of soil nail

现场观察表明,第三步开挖开始前地表已开始出现微裂缝,走向与坑边平行,宽度约3~5 mm,分布在距基坑1~2 m和1~1.5倍挖深处。前者与土钉最大轴力的位置相近,后者则与拉张塑性区的位置相近。后经压密注浆处理,使基坑保持稳定。

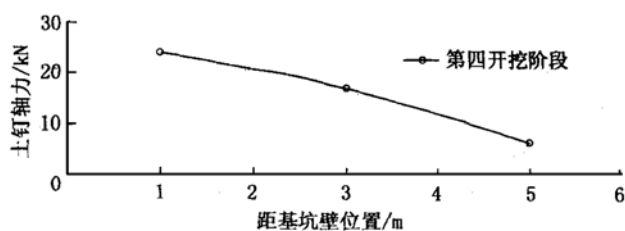


图11 第六排土钉轴力变化图

Fig. 11 Axial force of the sixth row of soil nail

5 结 语

(1) 在上海地区的含水饱和淤泥质和砂质粉土层,对基坑围护采用“复合土钉墙”是可行的。

(2) 对土体与土工结构接触特性的模拟,采用带转动自由度的 Goodman 单元建立了计算模型,使计算结果更接近实际情况。

(3) 计算表明,复合型土钉墙中,土钉内力在距开挖面1~2 m处最大,以后逐渐减少,其受力性能与土层锚杆类似。

(4) 处于松软地层中的复合土钉墙的受力及变形性状表明,经复合土钉支护加固后的基坑边坡,应视为人工改良边坡进行研究与分析。

参考文献:

- [1] 陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] 李象范,徐水根.复合土钉墙的研究[J].上海地质,1999(3):1~11.
- [3] Stocker M F, Riedinger G R. The bearing behavior of nailed retaining structures[J]. GSP ASCE, 1990.
- [4] 李象范,何之民,徐水根.淤泥地层中复合土钉墙的受力及变形性状[J].上海地质,1999(3):16~27.
- [5] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. J Soil Mech Found Div, ASCE, 1968, 94(SM3): 637~659.
- [6] Desai C S, Zaman M M, Lightner L G, et al. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics, 1984, 8(1): 19~43.
- [7] 殷宗泽,朱泓,许国华.土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J].岩土工程学报,1994,16(3):14~21.
- [8] 钟正雄,李象范,杨林德.软土地区复合土钉墙技术的有限元分析[J].上海地质,1999(3):28~33.
- [9] Chandrasekaran V S, King G J W. Simulation of excavation using finite element[J]. Geotech Div, ASCE, 1974, 100(GT9): 1086~1089.
- [10] 何之民,陶履彬.东方胆肝医院土钉支护测试[J].上海地质,1999(3):40~46.