

多支撑挡土结构考虑开挖过程的有限元分析方法

Finite element analysis of multi-braced retaining structures with consideration of the effect of staged excavation

肖宏彬^{1,2}, 王永和², 王星华²

(1. 株洲工学院 土木系, 湖南 株洲 412008; 2. 中南大学铁道学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 针对深基坑开挖中广泛采用的多支撑挡土结构, 考虑分步开挖的施工过程对支撑反力、挡土结构内力和位移的影响, 提出了以弹性地基梁理论为基础的有限元分析方法, 并推导出了各开挖阶段矩阵方程的形式。对工程实例进行了对比分析, 计算结果与实测结果非常吻合, 证明本文方法理论可靠、使用方便。

关键词: 深基坑; 多支撑挡土结构; 开挖过程; 有限单元法

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)01-0047-05

作者简介: 肖宏彬(1957-), 男, 湖南省邵东县人, 株洲工学院土木系主任、教授, 中南大学博士生, 主要从事岩土力学与基础工程的教学和研究工作。

XIAO Hong-bin, WANG Yong-he, WANG Xing-hua

(1. Department of Civil Engineering, Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou 412008, China; 2. School of Railway Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Multi-braced retaining structures have been widely used in the deep excavation. A finite element method based on the theory of elastic foundation beam are presented in this paper, with consideration of the effects of staged excavation upon the bracing force and the internal force as well as displacement of retaining structures. Meanwhile, the matrix equations in different stage have been derived. Comparison shows that the results obtained by the proposed method are very closed to the test data, thus the accuracy of the proposed method has been verified.

Key words: deep excavation; multi-braced retaining structure; excavation stage; finite element method

0 前言^①

随着我国城市高层建筑和市政建设的迅速发展, 深基坑开挖工程越来越多, 开挖深度也越来越大。为了确保施工过程中坑壁的稳定, 减少基坑开挖对周围建筑物和地下设施的影响, 深基坑开挖中通常采用有支撑的挡土结构体系(如板桩、钢筋砼排桩、拱形水泥土搅拌桩、地下连续墙等)。但随着开挖深度的加大, 支撑数量就越多, 对挡土结构的计算就越复杂。过去的计算大多是采用古典的板桩理论, 如等值梁法、山肩邦男法等^[1-3]。这些分析方法虽然使用简单, 但不能考虑开挖过程对支撑和结构的影响, 因而, 其计算结果往往是很粗略的。实际上, 多支撑挡土结构的计算是涉及到支撑—挡土结构—土共同作用的课题^[2,3]。它不但与土和挡土结构有关, 更与支撑情况, 特别是与支撑方式和开挖过程有关。

自从笔者 1992 年首次提出多支撑挡土结构考虑开挖过程的计算方法以来, 诸多学者在此基础上做了大量的研究, 在这一领域内取得了可喜的进展^[2-5]。本文用有限元方法模拟实际的施工过程和支挡体系的内力及变形的发展过程, 分析挡土结构的内力和变形。通过对工程实例的计算与实测对比, 证明本方法是可靠的, 并具有方法简单、计算精度高、使用方便等特点。本文编写的相应程序, 可解决工程设计和施工中的问题。

1 考虑开挖过程计算的基本原理

以往对多支撑挡土结构的计算, 一般都不考虑开挖过程, 支撑似乎是在开挖前就已存在, 也就是不考虑支撑反力和结构变形与开挖过程的关系。实际上, 多支撑挡土结构的内力和变形是随开挖过程的变化而变化的。如图 1 所示, 在有支撑情况下, 由于开挖和施加支撑是分步进行的, 每一道支撑在安置以前支撑安置处的结构已发生了初始变形(图 1 中的 δ_{10} 、 δ_{20} 、 δ_{30} 等)。

图 2(a), (b) 分别为没有考虑开挖过程和考虑开挖过程计算得到的结构位移和弯矩图。大量的实测资料显示结构的实际位移和弯矩与考虑开挖过程所得到的计算结果是一致的。不考虑开挖过程的计算结果使得结构的最大弯矩和位移偏小, 是偏于不安全的。这可能就是一些按古典理论设计的深基坑挡土结构发生工程安全事故的原因之一。

考虑开挖过程的计算方法就是要考虑支撑变形与结构变形的不同步性, 即每一道支撑都是在结构发生一定的变形以后才开始参与共同工作。因此, 考虑开挖过程的计算方法就是要分阶段计算。在最后开挖阶

① 基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(01JJY3043)

收稿日期: 2003-02-26

段将各阶段的支撑反力、结构内力和变形相迭加,就可得到实际的支撑反力、结构内力和变形。

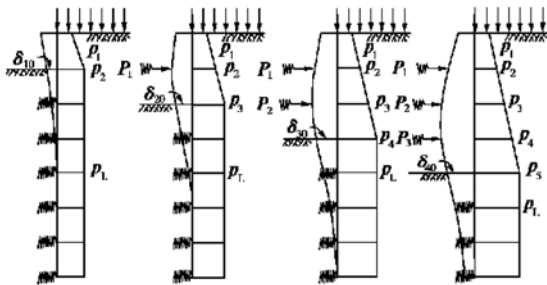


图1 不同开挖过程中的土压力和变形

Fig. 1 Earth pressure and displacement in different stage

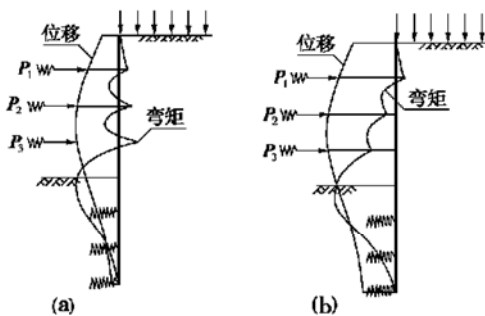


图2 变形和内力计算结果

Fig. 2 Calculated results of displacement and internal force

2 考虑开挖过程的有限元解

2.1 结构单元划分及内力和位移编码

根据文献[1, 6], 将弹性地基梁的有限单元法应用到挡土结构的计算分析中。对于如图3所示的挡土结构, 第一阶段开挖深度为 h_1 后, 施加第一道支撑, 再在第二阶段开挖至深度 h_2 施加第二道支撑, ..., 按此顺序直至挖到设计标高。结构单元可根据支撑数量和土层分布情况进行划分。一般取结构单元长度为 $L = 1 \sim 1.5$ m, 并保证在结构顶部、底部、各支撑点及各阶段开挖线处均有单元节点就可以。由于挡土结构所受到的荷载为侧土压力, 因此, 可将侧土压力化为等效集中

力和集中力矩作用到各节点上。各单元、节点编号及侧土压力如图3(b)所示(图中1, 2, ...表示节点编号, ①, ②...表示单元编号)。结构内力、变形及土弹簧反力和变形、支撑弹簧反力和变形如图3(c)所示。

对于有任意道支撑数的挡土结构, 若所划分的单元数为 n , 则节点数为 $n_n = n + 1$, 节点荷载数为 $n_p = 2n + 2$, 节点力个数为 $n_f = 3n$ 。

2.2 第一开挖阶段分析

对于图3所示的挡土结构, 在第一开挖阶段, 开挖深度为 h_1 (第一道支撑预定位置处), 此时, 所有支撑均未施加, 在开挖面以上土的侧土压力作用下, 支撑结构产生变形。根据侧土压力的分布可计算出各节点荷载 $P_1 \sim P_{24}$, 荷载列阵为 $\{P\}_1 = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_{24}\}^T$ 。第一开挖阶段末的土压力分布, 见图4(a)。

如图5所示, 由节点1的静力平衡条件得:

$$\begin{aligned} P_1 &= F_1, \\ P_{13} &= (F_1 + F_2)/L_1 \end{aligned} \quad (1)$$

同理, 由其它各节点的平衡条件分别可得到:

$$\begin{aligned} P_2 &= F_2 + F_3, \\ P_{14} &= -\frac{F_1 + F_2}{L_1} + \frac{F_3 + F_4}{L_2} - F_{23}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P_3 &= F_4 + F_5, \\ P_{15} &= -\frac{F_3 + F_4}{L_2} + \frac{F_5 + F_6}{L_3} - F_{24}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dots\dots \\ P_{11} &= F_{20} + F_{21}, \\ P_{23} &= -\frac{F_{19} + F_{20}}{L_{10}} + \frac{F_{21} + F_{22}}{L_{11}} - F_{32}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{12} &= F_{22}, \\ P_{24} &= -(F_{21} + F_{22})/L_{11} - F_{33} \end{aligned} \quad (5)$$

将式(1)~(5)用矩阵形式表示为

$$\{P\} = [A]\{F\}, \quad (6)$$

其中, 矩阵 $[A]$ 的阶数为 $n_p \times n_f$, 对于图3所示的结构为 24×33 阶。矩阵 $[A]$ 表示如下:

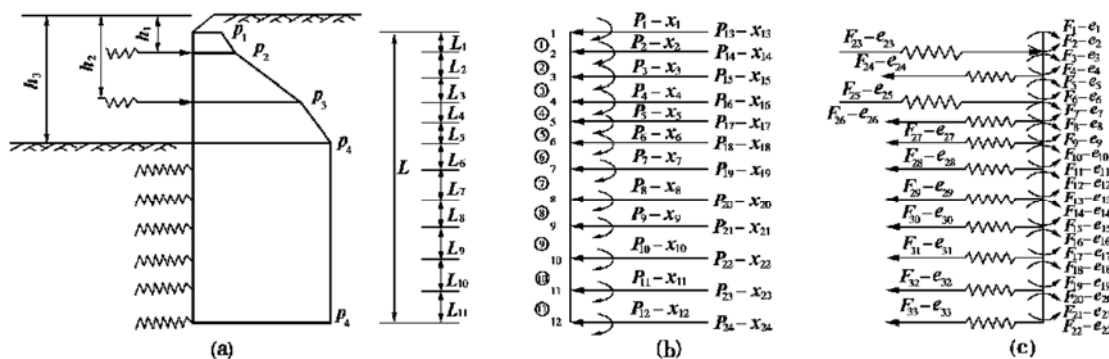


图3 单元、节点及内力和变形编号

Fig. 3 Number of element, node, internal force and displacement

$$\{F\} = [S]\{e\}, \quad (15)$$

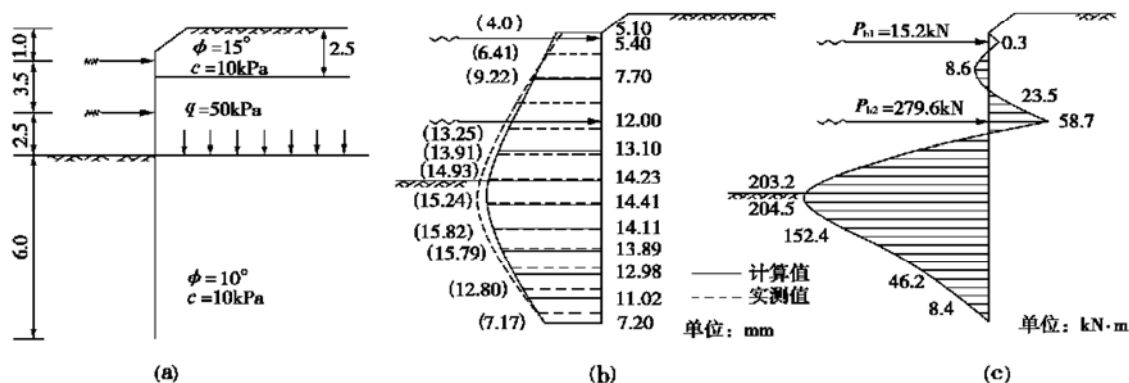


图7 上海某工程基坑围护结构

Fig. 7 A retaining structure in Shanghai

第一道支撑的反力和变形分别为

$$\left. \begin{aligned} F_{b1} &= \Delta F'_{23} + \Delta F''_{23}, \\ \delta_{b1} &= \Delta e'_{23} + \Delta e''_{23}, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

第二道支撑的反力和变形分别为

$$\left. \begin{aligned} F_{b2} &= \Delta F''_{25} \\ \delta_{b2} &= \Delta e''_{25} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

类似地,对于有任意道支撑的情况,按照以上的方法不难得到在任意开挖阶段的 $\{P\}$ 、 $\{A\}$ 和 $\{S\}$ 矩阵。从而可得到任意开挖阶段的结构内力和位移,也可得到支撑的反力和变形。

3 工程实例

图7(a)为上海某办公楼基坑,开挖深度为7m,采用具有两道支撑的钻孔灌注桩排桩挡土结构和 $\phi 590$ mm的钢管支撑,支撑刚度为 $k_{b1} = k_{b2} = 4.8 \times 10^5$ kN/m。坑底为淤泥质土,其弹性系数为 $m = 2500$ kN/m⁴。该基坑紧挨老办公楼基础,老办公楼5层,下有木桩,桩尖位于新办公楼基坑底标高处。因此,在计算时,考虑在该标高处作用有 $q = 50$ kN/m²的均布超载。现按本文方法进行计算分析。

计算结果见图7(b), (c), 图7(b)为按本文方法计算和实测的结构位移(图中实线所示为按本文方法计算得到的结构变形,虚线所示为实测的结构变形),图7(c)为按本文方法得到的结构弯矩图。从图7可以看出,计算结果与实测结果是非常吻合的,从而证明了本文方法的正确性和可行性。

4 结 论

(1) 根据对工程实例进行对比分析的结果可以看出,用本文方法对多支撑挡土结构进行内力和位移分析是可行的。其计算结果与实测结果非常吻合,计算过程比其它方法简单,而且易于处理各种不同的边界条件和荷载条件^[7-9]。

(2) 由于每一道支撑在安置前结构已发生了初变位,不考虑开挖过程的计算就是忽略了这些初变位,似乎是支撑在一开始就参与了共同工作,使得开挖面以上的结构变形偏小,而开挖面以下的结构变形偏大,同时也使得支撑反力和结构负弯矩偏大,这些都是与实测结果完全不同的。而且支撑数越多,不考虑开挖过程计算结果的误差就越大。因此,对于支撑开挖的挡土结构,应尽可能采用考虑开挖过程的方法进行计算。

(3) 本文方法便于在设计中通过调整支撑竖向间距和支撑预压力来改善结构内力和位移。

(4) 对于土的弹性系数,在本文中使用了“m”法计算,但本方法同样也适用于“c”法和其它方法。

参考文献:

- [1] Bowles J E 编. 基础工程分析与设计[M]. 唐念慈, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987. 25- 126.
- [2] 高大钊, 陈忠汉, 程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 97- 108.
- [3] 肖宏彬, 蔡伟铭. 多支撑挡土结构考虑开挖过程的计算分析方法[J]. 港口工程, 1992, 5(5): 44- 48.
- [4] 肖宏彬, 张亦静. 多支撑挡土结构考虑开挖过程计算的若干问题[J]. 建筑结构, 2000, 30(11): 41- 43.
- [5] 蔡伟铭, 熊祚森. 多支撑挡土结构考虑开挖过程的计算方法(“C”法)[J]. 建筑结构, 1996, 26(7): 15- 25.
- [6] Bowles J E. 基础工程结构分析及程序[M]. 胡人礼, 等译. 北京: 中国铁道出版社, 1982. 101- 243.
- [7] Paolo Carrubba, Pietro Colonna. A comparison of numerical methods for multi-tied walls[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 27(2): 117- 140.
- [8] Wolfgang Krajewski, Lorenz Edelmann, Ralf Plamitzer. Ability and limits of numerical methods for the design of deep construction pits[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(6, 7): 425- 444.
- [9] Hong S H, Lee F H, Yong K Y. Three-dimensional pile-soil interaction in soldier-piled excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(1): 81- 107.