

改进的杆系有限元在预应力锚杆柔性支护法中应用

贾金青¹, 陈国周¹, 孟祥波²

(1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室/结构研究所, 大连 116024; 2.鲁东大学 交通学院, 山东 烟台 264025)

摘要: 现在基坑设计中常用的杆系有限元计算方法是基于桩墙和锚杆联合支护的, 不适用于预应力锚杆柔性支护。根据预应力锚杆柔性支护法的施工特点, 改进了杆系有限元计算模型, 提出柔性支护的开挖荷载计算方法, 使之可以适用于预应力锚杆柔性支护法。编制了相应的计算程序, 最后对一个实际工程进行计算分析, 结果表明, 用改进后的杆系有限元方法可以计算出预应力锚杆柔性支护的基坑水平位移、锚杆轴力, 计算值与实测值较为吻合。

关键词: 深基坑开挖; 预应力锚杆柔性支护法; 数值模拟; 杆系有限元

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Application of modified beam-spring FEM to prestressed anchor flexible retaining wall

JIA Jin-qing¹, CHEN Guo-zhou¹, MENG Xiang-bo²

(1.Structural engineering institute of State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2.College of Communications, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: The conventional beam-spring FEM used in deep excavation retaining design is based on anchored pile or anchored diaphragm retaining; and it is not fit for prestressed anchor flexible retaining wall. Based on the construction characteristics of prestressed anchor flexible retaining wall, the beam-spring FEM is modified. A new technique to evaluate the excavating load for flexible retaining is given; and a new beam-spring FEM program is developed correspondingly. Lastly a practical engineering project is analyzed using the new beam-spring FEM code. The horizontal displacement of retaining wall and the axial force of each anchor are yielded and compared with the field data; and it is shown that the new beam-spring FEM suits prestressed anchor flexible retaining wall.

Key words: deep excavation; prestressed anchor flexible retaining; numerical simulation; beam-spring FEM

1 引言

杆系有限元方法与传统的静力平衡法相比有其优越性, 能够计算出不同开挖阶段的坑壁位移、桩身弯矩和锚杆内力随深度的变化, 最大限度地协调支护结构与土体的变形关系。杆系有限元相对于连续体有限元而言, 比较简单, 计算参数较容易确定, 因此在实际工程中得到广泛应用, 并被写入国家规范, 在《建筑基坑支护技术规程》^[1]中称为“弹性支点法”, 在《建筑基坑工程技术规范》^[2]中称为“土抗力法”。然而, 基坑规范的杆系有限元方法只是适用于桩墙拉锚或内撑的支护方法, 不适用于预应力

锚杆柔性支护。桩墙拉锚或内撑支护相对于重力式挡墙之类的刚性支护而言, 在传统意义上也被称为柔性支护^[3]。本文所研究的柔性支护则是指开挖前不设置地下连续墙或排桩, 开挖一层后支护一层, 其支护面层一般用喷射混凝土, 锚固力由锚杆提供(图1)。桩墙拉锚或内撑支护相对于本文的柔性支护而言则成为刚性支护。本文改进了杆系有限元计算模型, 提出柔性支护的开挖荷载计算公式, 使之可以适用于预应力锚杆柔性支护法, 编制了相应的计算程序, 最后对一项实际工程进行计算分析, 结果与实测数据较为吻合。

收稿日期: 2005-11-15 修改稿收到日期: 2006-05-15

基金项目: 建设部软科学研究项目(No. 05-K1-25)。

作者简介: 贾金青, 男, 1962年生, 博士后, 教授、博士生导师, 主要从事地基处理、深基坑及高边坡支护技术的研究和应用工作。

E-mail: keyknown@163.net

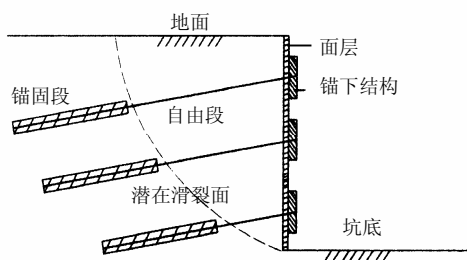


图 1 预应力锚杆柔性支护示意图

Fig.1 Schematic diagram of prestressed anchor flexible retaining wall

2 基坑杆系有限元基本原理

杆系有限元是有限元方法中较早发展起来的一个分支，它是结构位移法的一种推广，采用结构力学中的位移法原理及矩阵代数运算，所以在结构力学中又称为“矩阵位移法”^[4]。应用杆系有限元方法计算基坑时，要先把基坑支护结构划分为有限个单元，通常是以梁截面刚度变化处、土层变化处、锚撑处、基坑底面处作为节点，将梁划成若干单元，各单元仅在边界上的节点处相连接。土体采用文克尔（Winkler）假定，即弹性抗力与水平位移值之间成一定的比例关系：

$$P = K\delta \quad (1)$$

式中： P 为弹性抗力强度值； K 为弹性抗力系数； δ 为计算点的位移。

弹性地基梁的刚度矩阵 $[K]$ 的推导，可参阅文献^[5]，这里不再赘述。

在基坑杆系有限元中，假定锚杆只受拉力，不受弯矩，所以可以用弹簧来模拟锚杆。锚杆侧向弹性抗力系数 K_T 应由锚杆基本试验确定，当无试验资料时，可按文献^[2]规定的公式计算：

$$K_T = \frac{3A_s E_s E_c A_c}{3l_f E_c A_c + E_s A_s l_a} \cos^2 \theta \quad (2)$$

式中： A_s 为杆体截面面积； E_s 为杆体弹性模量； E_c 为锚固体组合弹性模量； A_c 为锚固体截面面积； l_f 为锚杆自由段长度； l_a 为锚杆锚固段长度； θ 为锚杆水平倾角。

3 改进的杆系有限元模型

预应力锚杆柔性支护法现已在实际工程中得到广泛的应用，但是理论研究落后于实践，文献^[6, 7]研究了预应力锚杆柔性支护的变形性状和应力状态，但实际设计方法还是传统的静力平衡法。本文根据预应力锚杆柔性支护法的特点，改进了杆系有

限元计算模型，主要有下列的改进。

3.1 考虑施工特点改进模型深度

基坑规范的计算模型的总深度等于桩墙的总长度，而桩墙在基坑开挖之前已施工好，是不随基坑开挖过程而变化的。预应力锚杆柔性支护的施工过程如图 2 所示，与土钉有点相似，都是自上而下先开挖、支护、再开挖、再支护，一直到基坑底部结束，本文的改进模型的总深度是随着开挖而变化的，这是为了模拟柔性支护法的“分层开挖、分层支护”的特点。

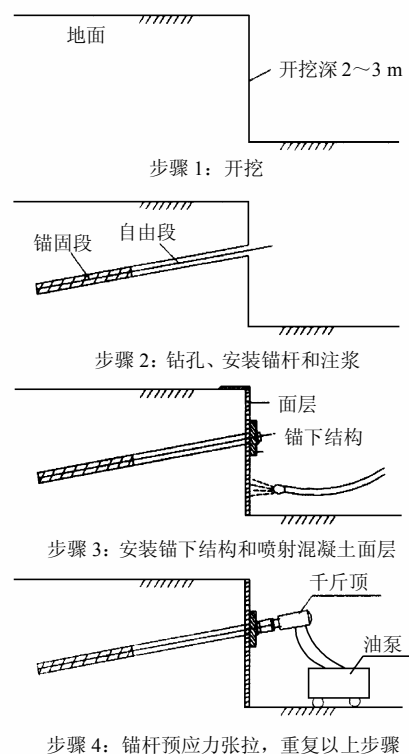


图 2 预应力锚杆柔性支护施工步骤

Fig.2 Construction process of prestressed anchor flexible retaining wall

3.2 考虑开挖影响深度

据德国 Stuttgart 一处永久土钉支护的实测资料表明，开挖对坑底的土体应力有影响，影响深度约为开挖深度的 20 %~60 %，具体与底部土体的强度有关^[8]。文献^[9]对基坑开挖卸载研究后的结论认为，坑底土体应力变化的影响深度大约等于开挖深度，而本文的改进模型在每层开挖的深度下还有一定的影响深度，这正是考虑了柔性支护中开挖对坑底土体应力的影响。在本文所研制的程序中，影响深度可以由使用者根据实际土体情况输入。

3.3 考虑面层和锚下承载支护结构的支护特点

基坑规范计算模型中的梁单元是模拟桩墙结构

的, 其刚度是不随开挖支护过程而变化的 (图 3)。本文改进模型中的梁单元是模拟面层和锚下承载支护结构的, 在开挖支护过程中是逐步把刚度加上的 (图 4)。具体的处理方法是: 如果还没有支护, 则相应的梁单元的刚度为 0; 如果已经支护了面层, 则相应的梁单元的刚度用实际面层刚度; 如果已经支护了面层和锚下支护结构, 则相应的梁单元的刚度用实际面层和锚下支护结构的刚度叠加值。本文中锚杆的模拟及预应力的处理方法与文献[2]相同, 这里不再赘述。

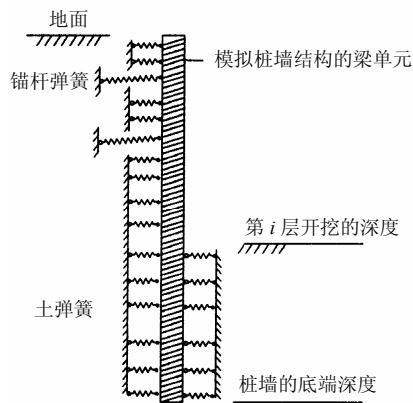


图3 基坑规范的杆系有限元模型

Fig.3 Beam-spring finite element model of excavation retaining in specification

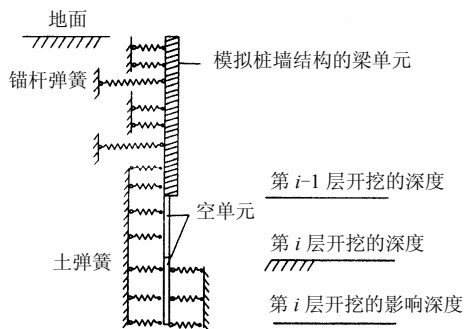


图4 预应力锚杆柔性支护的杆系有限元模型

Fig.4 Beam-spring finite element model of prestressed anchor flexible retaining wall

4 开挖荷载的计算

现有的杆系有限元计算, 都用人为选定的土压力来作为开挖荷载, 有的用静止土压力^[2], 有的用主动土压力^[10], 有的提出新的土压力模式^[11], 这样人为选定土压力的不足之处在于: 没有考虑开挖前土体的真实内力, 而开挖的过程本质上是被开挖土体的内力的释放, 从而在开挖面形成自由应力面。本文的开挖荷载采用被开挖的土体在开挖前的内力

卸载, 如图5所示。柔性支护的面层刚度很小, 面层所能传递的力很小, 这样就需要土体传递剪力, 所以对开挖荷载的分布进行改进。

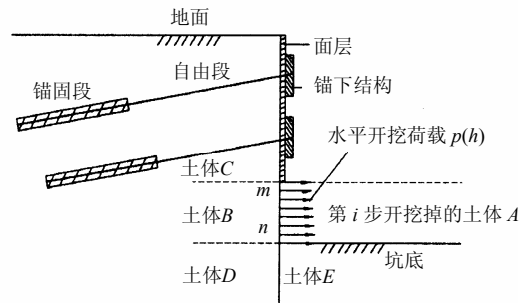


图5 开挖卸载示意图

Fig.5 Schematic diagram of stress release during excavation

设第*i*步产生的总开挖荷载为 F_i , 其值由下式计算:

$$F_i = \int_m^n p(h) dh \quad (3)$$

式中: h 为基坑深度; $p(h)$ 为开挖前坑底水平土压力, 是 h 的函数。

式(3)是个积分表达式, 但在杆系有限元中, 土体已经离散为土弹簧, 因此只需把相应范围内的土弹簧内力叠加即可。

令没支护前开挖面所释放的荷载之和为 F_{li} , 往开挖面上、下所传递的荷载之和为 F_{2i} , 显然有

$$F_i = F_{li} + F_{2i} \quad (4)$$

引入释放荷载系数 β_1 , 表示开挖面土体释放开挖荷载的能力, 与土体的参数和每步开挖的深度有关, 定义为开挖面所释放的荷载与总开挖荷载的比值, 则有

$$\beta_1 = \frac{F_{li}}{F_i} \quad (5)$$

同理, 引入传递荷载系数 β_2 , 则

$$\beta_2 = \frac{F_{2i}}{F_i} \quad (6)$$

由式(4)~(6), 得

$$\beta_1 + \beta_2 = 1 \quad (7)$$

下面推导开挖荷载沿坑壁是如何分布的: 为便于计算, 对开挖荷载的分布进行简化。简化的依据是, 土体A挖掉之后, 土体B由于卸载作用要向坑内产生位移。在这个过程中, 一方面, 土体B在开

挖面上要释放开挖荷载, 设开挖面释放的开挖荷载沿开挖面为直线分布, 其平均值为 P_1 。另一方面, 土体 B 向土体 D 和土体 E 传递水平剪应力, 也就是把开挖荷载向开挖面的上、下方的土体传递, 离开挖面越近则所获得的开挖荷载越大。由此可以假设在开挖面以上开挖荷载沿深度线性分布, 最大值为 P_2 , 在第 $i-1$ 排锚杆的锚头处, 最小值在地面处为 0。设开挖面以下沿深度也呈线性分布, 最大值为 P_2 , 在第 i 层开挖面的底端; 最小值在影响深度处为 0, 如图 6 所示。根据力的平衡, 有

$$P_1 l_3 = \beta_1 F_i \quad (8)$$

$$\frac{P_2 l_1}{2} + \frac{P_2 l_2}{2} + \frac{P_1 l_2}{2} + \frac{P_2 l_4}{2} = (1 - \beta_1) F_i \quad (9)$$

由式 (8) 得

$$P_1 = \frac{\beta_1 F_i}{l_3} \quad (10)$$

又由式 (9)、式 (10) 得

$$P_2 = \frac{(2l_3 - 2\beta_1 l_3 + l_2) F_i}{(l_1 + l_2 + l_4) l_3} \quad (11)$$

式中: P_1 为开挖面所释放的开挖荷载平均值; P_2 为开挖面以上及以下所传递到的开挖荷载最大值; l_1 为地面到第 $i-1$ 排锚杆锚头深度的距离; l_2 为开挖面上端点到第 $i-1$ 排锚杆锚头深度的距离; l_3 为第 i 步开挖的深度; l_4 为第 i 步开挖的影响深度。

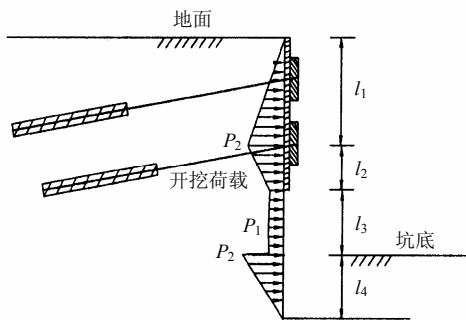


图 6 简化的开挖荷载分布

Fig.6 Modified distribution of excavating load

5 程序实现与工程实例验算

根据上述的理论, 用 Fortran95 编制了相应的程序 APAFR (analysis of prestressed anchor flexible retaining)。为验证理论和计算程序, 对一个工程实例进行计算分析。

大连远洋大厦深基坑工程采用了预应力锚杆

柔性支护法进行支护, 并取得了成功。该基坑是目前国内采用预应力锚杆柔性支护法最深的基坑, 深度高达 25.6 m, 自上而下共设置 11 排锚杆, 锚杆长 5.0~20.0 m, 竖向间距为 2 m, 水平间距为 1.6 m, 锚杆孔径为 130 mm, 注浆采用 M30 水泥砂浆, 锚杆采用公称直径为 15.24 mm 的高强度低松驰钢绞线, 钢绞线标准强度为 1 860 MPa。在坑壁表面绑扎钢筋网 $\phi 6@200$ mm, 喷射混凝土的厚度在基坑上部为 100 mm, 下部为 150 mm。锚下承载结构采用 10# 槽钢和 14# 槽钢焊接制作, 锚杆通过锚下承载结构与混凝土面层连接^[6]。

用本文的程序 APAFR 按工程的设计方案进行杆系有限元分析, 划分为 60 个梁单元, 120 个土弹簧单元、11 个锚杆弹簧单元。锚杆弹簧的计算参数: $A_s = 5.47 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $E_s = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, $A_c = 1.33 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, $E_c = 3.52 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。土弹簧刚度用 m 法计算, 按文献[12]的资料取值, $m = 8 \times 10^3 \text{ kN/m}^4$ 。取影响深度为每步开挖厚度的 60%, 释放荷载系数 β_1 取 0.1, 程序计算出每步开挖后的基坑水平位移如图 7 所示。水平位移基本上随深度的增加而逐渐减小。实际测量水平位移最大值在基坑顶部为 28.7 mm, 本文计算的水平位移在基坑顶部为 30 mm, 在基坑顶部往下 2 m 处达到最大值为 32 mm, 可以认为计算值与实测值较接近。

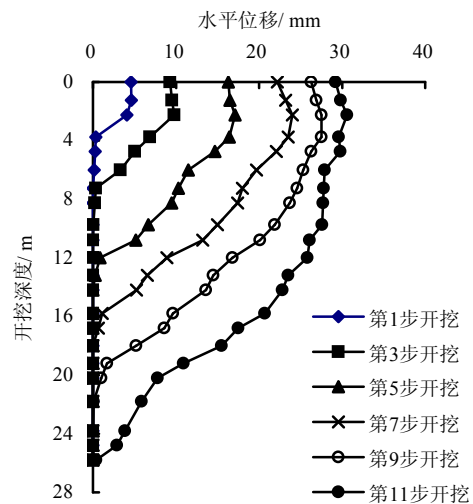


图 7 每步开挖后基坑的水平位移

Fig.7 Horizontal displacement of anchored wall after each excavation

图 8 为各步开挖后的各层锚杆自由段的轴力。从图中可以看出, 基坑中下部的锚杆的轴力较大, 轴力沿着基坑深度成弓形分布, 这与用 Terzaghi-Peck 土压力模型^[3]求出的锚杆轴力是一致的。

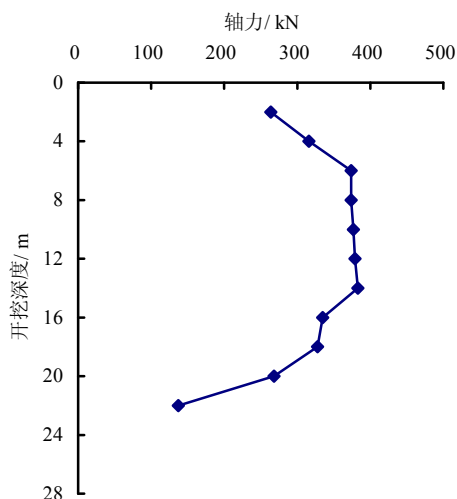


图 8 最后一步开挖后各层锚杆的轴力

Fig.8 Axial force of each anchor after complete excavation

6 结 论

(1) 根据预应力锚杆柔性支护法的施工特点, 改进了杆系有限元计算模型, 并推导出柔性支护的开挖荷载计算公式。

(2) 依据本文的理论编制计算程序, 计算结果与工程实测数据较为吻合, 证明用本文提出的改进杆系有限元计算模型是适用于预应力锚杆柔性支护法的。

(3) 本文的改进杆系有限元方法虽然是针对预应力锚杆柔性支护法而提出的, 但也可适用于土钉支护、土钉和预应力锚杆联合支护。

参 考 文 献

- [1] JGJ120-99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] YB9258-97, 建筑基坑工程技术规范[S].
- [3] Karl Terzaghi, Ralph B Peck. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. New York : John Wiley & Sons, 1967.
- [4] 龙驭球, 包世华. 结构力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [5] Smith I M, Griffiths D V. 有限元方法编程[M]. 王崧等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] 贾金青. 预应力锚杆柔性支护法研究[R]. 北京: 清华大学, 2003.
- [7] 朱亚林, 孔宪京, 邹德高, 等. 深基坑预应力锚杆柔性支护的非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 323-327.
ZHU Ya-lin, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Nonlinear finite element analysis of prestressed anchor flexible retaining for deep excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 323-327.
- [8] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] 孙秀竹. 应力场的变化与卸荷影响深度的关系[J]. 勘察科学技术, 2004, (4): 12-15.
SUN Xiu-zhu. Relationship between change of stress field and depth of influence for unloading[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2004, (4): 12-15.
- [10] 杨志明, 姚爱国. 杆系有限元法求解复合土钉支护结构的位移[J]. 煤炭地质与勘探, 2002, 30(5): 31-34.
YANG Zhi-ming, YAO Ai-guo. Displacement analysis of compound soil nail support structure for excavation by one dimension finite element[J]. **Coal Geology and Exploration**, 2002, 30(5): 31-34.
- [11] 陈页开, 徐日庆, 杨晓辉, 等. 基坑工程柔性挡墙土压力计算方法[J]. 工业建筑, 2001, 31(3): 1-4.
CHEN Ye-kai, XU Ri-qing, YANG Xiao-hui, et al. A new method calculating earth pressure on flexible structures for excavation work[J]. **Industrial Construcyion**, 2001, 31(3): 1-4.
- [12] 程良奎, 范景伦, 韩军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [6] 周翠英, 刘祚秋, 董立国, 等. 边坡破坏过程的大变形有限元分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 644-647, 652.
ZHOU Cui-ying, LIU Zuo-qiu, DONG Li-guo, et al. Large deformation fem analysis of slope failure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 644-647, 652.
- [7] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003, (1): 21-27.
ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (1): 21-27.
- [8] Ugai K, Leshchinsky D. Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results[J]. **Soils and Foundations**, 1995, 35(4): 1-7.
- [9] Manzari M T, Mohamed A N. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(1): 75-80.
- [10] 张培文, 陈祖煜. 剪胀角对求解边坡稳定的安全系数的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 1757-1760.
ZHANG Pei-wen, CHEN Zu-yu. Finite element method for solving safety factor of slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 1757-1760.
- [11] Hibbit. Karlsson, Sorensen, ABAQUS/Scripting Manual (Version 6.3)[M]. HKS: Providence, [s. n.], 2002.

上接第 2313 页